



Diplomarbeit Nr.: D-SS07-UT 8

## Optimierung der Pelletproduktion



Untersuchungen zum Einfluss von  
Pelletqualität und Feuerraumdesign

von Bastian Lehmann  
Leipzig, August 2007



Ingenieurwissenschaften I  
Umwelttechnik/Regenerative Energien

Erstgutachter/in: MSc Dipl.-Ing (FH) Janet Witt  
Zweitgutachter/in: Prof. Dr. Manfred Sohn  
Vorsitzender des  
Prüfungsausschusses: Prof. Dr. Arman Raphaelian

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole</b>	<b>VI</b>
<b>Verwendete Formelzeichen und Indizes</b>	<b>VIII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung . . . . .	2
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Holzpellets . . . . .	5
2.1.1 Nutzungsaspekte . . . . .	5
2.1.2 Elementargehalte . . . . .	6
2.1.3 Energieträgerspezifische Eigenschaften . . . . .	8
2.1.4 Physikalisch-mechanische Eigenschaften . . . . .	14
2.1.5 Herstellung . . . . .	17
2.2 Verbrennung biogener Festbrennstoffe . . . . .	20
2.2.1 Grundbegriffe . . . . .	21
2.2.2 Grundlagen der Verbrennung . . . . .	25
2.2.3 Schadstoffbildung . . . . .	28
2.2.4 Anforderungen an die Feuerraumkonstruktion . . . . .	32
2.3 Feuerungsanlagentechnik . . . . .	33
2.3.1 Feuerungsprinzipien . . . . .	34
2.3.2 Systemeinbindung . . . . .	35
<b>3 Methodik und Materialien</b>	<b>38</b>

3.1	Brennstoffe . . . . .	38
3.2	Verwendete Feuerungsanlagen . . . . .	40
3.2.1	Auswahlkriterien . . . . .	40
3.2.2	Paradigma Pelletti II SR 203 . . . . .	41
3.2.3	Viessmann Vitolog 300 VL3A . . . . .	42
3.3	Anlagenspezifische Anpassungen für die Versuchsdurchführung . . . . .	44
3.3.1	Hintergrund . . . . .	44
3.3.2	Anpassungen am Paradigma Pelletti II SR 203 . . . . .	45
3.3.3	Anpassungen am Viessmann Vitolog 300 VL3A . . . . .	46
3.4	Messanordnung . . . . .	48
3.5	Messtechnik . . . . .	49
3.5.1	Messumfang . . . . .	49
3.5.2	Kontinuierlich erfasste Messgrößen . . . . .	51
3.5.3	Diskontinuierlich erfasste Messgrößen . . . . .	51
3.6	Versuchsprogramm . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Versuchsergebnisse</b>	<b>54</b>
4.1	Pelletlängen und Förderrate . . . . .	54
4.2	Feinanteil im Betrieb . . . . .	57
4.3	Luftüberschuss . . . . .	58
4.4	Emissionen . . . . .	61
4.4.1	Kohlenmonoxid . . . . .	61
4.4.2	Stickoxide . . . . .	63
4.4.3	Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC) . . . . .	65
4.4.4	Staub . . . . .	67
4.5	Ascheerweichung . . . . .	69
4.6	Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad . . . . .	75
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b>	<b>78</b>
	<b>Anhang</b>	<b>82</b>
<b>A</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>82</b>
<b>B</b>	<b>Qualitätsanforderungen an Holzpellets</b>	<b>87</b>
<b>C</b>	<b>Übersicht über Emissionsgrenzwerte</b>	<b>89</b>

<b>D</b>	<b>Verbrennungsrechnung</b>	<b>92</b>
D.1	Basis . . . . .	92
D.2	Sauerstoff- und Luftbedarf . . . . .	95
D.3	Abgasmenge und Zusammensetzung . . . . .	96
D.4	Bestimmung des Luftüberschusses $\lambda$ . . . . .	98
D.5	Wärmeinhalt der Abgase (Abgasverlust) . . . . .	104
<b>E</b>	<b>Technische Daten der Feuerungsanlagen</b>	<b>109</b>
<b>F</b>	<b>Versuchsbrennstoffe - Analysedaten</b>	<b>111</b>
F.1	Elementaranalyse . . . . .	112
F.2	Alkalienanalyse . . . . .	114
<b>G</b>	<b>Messdaten</b>	<b>115</b>
G.1	Emissionen . . . . .	115
G.2	Glutbetttemperatur . . . . .	121

## Abkürzungsverzeichnis und verwendete Symbole

Abkürzung/Symbol	Bedeutung
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
CH <sub>4</sub>	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
EL	extra leichtflüssig ( <i>bei Heizöl</i> )
FeuVO	Feuerungsverordnung
FR	Feuerraum
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
HC	flüchtige organische Substanzen
HCN	Cyanwasserstoff
HCl	Chlorwasserstoff
HG	Hackgut
HP	Holzpresslinge/Holzpellets
KEA	kumulierter Energie-Aufwand
NH <sub>i</sub>	Stickstoff-Wasserstoff-Verbindungen
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
PCDD	polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (Dioxine)
PCDF	polychlorierte Dibenzofurane
PHM	Presshilfsmittel
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente
RI	Richtlinie
RP	Rindenpresslinge
S	schwerflüssig ( <i>bei Heizöl</i> )
SCR	selektive katalytische Reduktion <i>Verfahren zur Rauchgasentstickung</i>
SNCR	selektive nicht-katalytische Reduktion <i>Verfahren zur Rauchgasentstickung</i>
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
TA - Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TM	Trockenmasse

<b>Abkürzung/Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
TOC	Gesamtkohlenstoffgehalt <i>engl.: Total Organic Carbon</i>
wf	wasserfrei
waf	wasser- und aschefrei
⊘	Durchschnitt

## Verwendete Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$A_1, A_2, B, f_{B0}$	brennstoffspezifische Koeffizienten	
$E$	Emission	mg/Nm <sup>3</sup> bei 13% $O_2$
$D$	Durchmesser	cm
$H_u$	Heizwert	MJ/kg
$H_o$	Brennwert	MJ/kg
$H$	Enthalpie	kJ/mol
$\Delta H$	Enthalpiedifferenz	kJ/mol
$m$	Masse	kg
$\dot{m}$	Massenstrom	kg/s
$p$	Druck	Pa
$Q$	Wärmemenge	kJ
$\dot{Q}$	Wärmestrom	kJ/s
$q_A$	Abgasverlust	%
$T$	Temperatur	K
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	K
$V$	Volumen	m <sup>3</sup>
$\dot{V}$	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /s
$u$	Feuchtegehalt des Brennstoffes	%
$w$	Wassergehalt im Brennstoff	%
$\gamma$	Volumenanteil	Vol. – % bzw. m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
$\eta$	Wirkungsgrad	–
$\lambda$	Luftüberschusszahl	–
$\mu$	Massenanteil	Mass. – % bzw. kg/kg
$\vartheta$	Temperatur	°C
$\Delta \vartheta$	Temperaturdifferenz	°C



**Indizes (tiefgestellt)**

0	Bezugswert
<i>A</i>	Abgas
<i>Asche</i>	Asche
<i>B</i>	Brennstoff
<i>C</i>	Kohlenstoff
<i>CO</i>	Kohlenmonoxid
<i>EP</i>	Erweichungspunkt (Ascheschmelzverhalten)
<i>F</i>	Feuerung
<i>f</i>	feucht
<i>FP</i>	Fließpunkt (Ascheschmelzverhalten)
<i>GB</i>	Glutbett
<i>H</i>	Wasserstoff
<i>HK</i>	Halbkugelpunkt (Ascheschmelzverhalten)
Iso	Strahlung/Konvektion
ideal	Wert bei $\lambda = 1$
<i>K</i>	Kessel
<i>L</i>	(Verbrennungs-)Luft
max	Maximalwert
min	Minimalwert
<i>Nutz</i>	Nutzen
<i>N</i>	Stickstoff
<i>NO<sub>x</sub></i>	Stickoxide
<i>O</i>	Sauerstoff
<i>pr</i>	praktisch (mit Luftüberschuss)
real	gemessene Größe
<i>S</i>	Schwefel
<i>SB</i>	Sinterbeginn (Ascheschmelzverhalten)
<i>SP</i>	Sphärischtemperatur (Ascheschmelzverhalten)
<i>th</i>	theoretisch
<i>tr</i>	trocken
<i>TOC</i>	Gesamtkohlenstoff
Unv	Unverbranntes
üb	Überschuss
<i>w</i>	Wasser

$wf$	wasserfrei
$waf$	wasser- und aschefrei

$(aq)$	in wässriger Lösung
$(g)$	gasförmig
$(l)$	flüssig
$(m)$	massebezogen
$(p)$	bei konstantem Druck
$(s)$	fest
$(v)$	volumenbezogen

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Sägerestholz als Rohstoff zur Holzpellettherstellung . . . . .	18
2.2	Arbeitsweise einer Kollergangpresse mit Ringmatrize . . . . .	19
2.3	Schema einer Pelletierungsanlage . . . . .	20
2.4	Bezugszustände fester Brennstoffe . . . . .	21
2.5	Einfluss der Luftüberschusszahl $\lambda$ bzw. des Restsauerstoffes auf die Emissionen und den Wirkungsgrad einer Feuerungsanlage . . . . .	23
2.6	Schematische Darstellung des Verbrennungsprozesses . . . . .	26
2.7	Staubbildung in Verbrennungssystemen: Partikelwachstum und deren Transport . . . . .	30
2.8	Feuerungssysteme für Festbrennstoffe bei Kleinfeuerungsanlagen . . . .	34
3.1	Schematische Innenansicht des Paradigma Pelletti II SR 203 . . . . .	41
3.2	Detailansicht des Brennertellers beim Paradigma Pelletti II SR 203 . .	42
3.3	Schematische Innenansicht des Viessmann Vitolig VL3A . . . . .	43
3.4	Detailaufnahmen des Feuerraumes Viessmann Vitolig VL3A . . . . .	44
3.5	Wärmetauscher des Pelletti II SR 203 . . . . .	45
3.6	Lage des Temperaturfühlers zur Erfassung der Temperatur im Glutbett beim Pelletti II SR203 . . . . .	46
3.7	Lage des Temperaturfühlers zur Erfassung der Temperatur im Glutbett beim Viessmann VL3A . . . . .	48
3.8	Räumliche Anordnung des Versuchsstandes . . . . .	49
4.1	Längenverteilung der untersuchten Holzpellets . . . . .	55
4.2	mittlere Förderrate in kg/h in Abhängigkeit vom Presshilfsmittel . . .	56
4.3	mittlerer Feinanteil in % von Holzpellets ohne Presshilfsmittel und mit Kartoffelstärke nach Durchgang durch die Förderschnecke . . . . .	58
4.4	mittlere Luftüberschusszahl in Abhängigkeit vom Presshilfsmittel . . .	60
4.5	mittlere Kohlenmonoxidemissionen ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ bei 13% Sauerstoff) im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoff . . . . .	63

4.6	mittlere Stickoxidemissionen ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ bei 13 % Sauerstoff) im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoff . . . . .	65
4.7	mittlerer Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC) ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ bei 13 % Sauerstoff) im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoff . . . . .	67
4.8	mittlerer Staubgehalt ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ bei 13 % Sauerstoff) im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoff . . . . .	69
4.9	Leichte Aschezusammenbackungen auf dem Brennerteller des Paradigma Pelletti II SR203 . . . . .	70
4.10	Spuren zusammenhaftender Aschepartikel in der Brennerschale des Viessmann Vitolig VL3A . . . . .	70
4.11	Glutbetttemperatur (in $^{\circ}\text{C}$ ) des Paradigma Pelletti II SR203 . . . . .	71
4.12	Glutbetttemperatur (in $^{\circ}\text{C}$ ) des Viessmann Vitolig VL3A . . . . .	71
4.13	mittlere Abgasverluste (in %) in Abhängigkeit vom Brennstoff . . . . .	77
C.1	Grenzwerte für Staub . . . . .	90
C.2	Grenzwerte für CO . . . . .	90
C.3	Grenzwerte für $\text{NO}_x$ . . . . .	91
C.4	Grenzwerte für $\text{SO}_2$ . . . . .	91
F.1	Detailaufnahmen der verschiedenen Pelletchargen (jeweils ca. 100 g) . .	111
G.1	mittlere Kohlenmonoxidemissionen in $\text{mg}/\text{Nm}^3$ (bezogen auf 13% Sauerstoffgehalt) im Detail . . . . .	118
G.2	mittlere Stickoxidemissionen in $\text{mg}/\text{Nm}^3$ (bezogen auf 13% Sauerstoffgehalt) im Detail . . . . .	119
G.3	mittlere Gesamt-C-Emissionen (TOC) in $\text{mg}/\text{Nm}^3$ (bezogen auf 13% Sauerstoffgehalt) im Detail . . . . .	120
G.4	Glutbetttemperatur des Viessmann Vitolig VL3A bei verschiedenen Presshilfsmitteln . . . . .	122
G.5	Glutbetttemperatur des Paradigma Pelletti II SR203 bei verschiedenen Presshilfsmitteln . . . . .	123

# Tabellenverzeichnis

2.1	Elementarzusammensetzung und typische Größenordnung der Elemente bei Holzbrennstoffen . . . . .	7
2.2	Auswirkungen der Elementargehalte biogener Festbrennstoffe . . . . .	8
2.3	Wassergehalt verschiedener Festbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets	9
2.4	Heizwert verschiedener Festbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets . .	10
2.5	Durchschnittlicher Gehalt an flüchtigen Bestandteilen bei verschiedenen Brennstoffen . . . . .	12
2.6	Kenndaten der Schätzfunktionen zur Berechnung des Sinterbeginns, des Erweichungspunktes und des Fließpunktes für Aschen biogener Festbrennstoffe . . . . .	14
2.7	Einflussmöglichkeiten energieträgerspezifischer Eigenschaften biogener Festbrennstoffe . . . . .	14
2.8	Schütt- bzw. Stapeldichten und Heizwert von Biobrennstoffen bei 15% Wassergehalt . . . . .	16
2.9	Einflussmöglichkeiten physikalisch-mechanischer Eigenschaften biogener Festbrennstoffe . . . . .	17
2.10	Feuerungssysteme für Holzpellets und deren Leistungsbereiche . . . . .	35
3.1	Abrieb und Ascheschmelzverhalten der Versuchspellets . . . . .	39
3.2	Art und Umfang der Messdatenerfassung . . . . .	50
3.3	Kontinuierlich erfasste Messgrößen sowie Messprinzip und Messbereich	51
3.4	Versuchsprogramm . . . . .	53
4.1	Maximal-, Minimal- und mittlere Glutbetttemperaturen des Viessmann Vitolig VL3A und des Paradigma Pelletti II SR203 . . . . .	74
B.1	Qualitätsanforderungen an Holzpellets (I) . . . . .	87
B.2	Qualitätsanforderungen an Holzpellets (II) . . . . .	88
D.1	Zusammensetzung der Luft . . . . .	93
D.2	Molmassen und Molvolumina typischer Brennstoffbestandteile . . . . .	93

D.3	Spezifische Zusammensetzung und Abgaswerte ausgewählter Brennstoffe	103
D.4	Zwischengrößen und Koeffizienten der Versuchsbrennstoffe zur Bestimmung des Abgasverlustes . . . . .	108
E.1	Technische Daten der Feuerungsanlagen . . . . .	110
F.1	Elementaranalyse der reinen PHM und der Versuchspellets . . . . .	113
F.2	Alkalienanalyse der reinen PHM und der Versuchspellets . . . . .	114
G.1	mittlere Emissions-, Abgasverlust- und Luftüberschusswerte des Paradigma Pelletti II SR 203 . . . . .	116
G.2	mittlere Emissions-, Abgasverlust- und Luftüberschusswerte des Viessmann Vitolig VL3A . . . . .	117

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Mit der Nutzung von Biomasse als Energieträger kann im Vergleich zu fossilen Energieträgern eine Reduktion des Ausstoßes von Kohlendioxid bei gleichzeitiger Erhöhung der Versorgungssicherheit durch Nutzung lokaler Ressourcen erreicht werden. Insbesondere die bedarfsabhängige Erzeugung von Energie zur Grundlastversorgung stellt gegenüber anderen regenerativen und witterungsabhängigen Energieerzeugungstechniken wie Solar- oder Windkraftanlagen einen Vorteil dar. Zusätzlich bietet eine stärkere Biomassenutzung auch die Möglichkeit, die regionale Wertschöpfung zu erhöhen und so Arbeitsplätze im ländlichen Raum zu sichern oder neu zu schaffen.

Traditionell wird Biomasse vor allem zur Wärmeerzeugung, vorwiegend in Kleinfeuerungsanlagen und waldreichen Gebieten als Scheitholz oder Holzhackschnitzel, genutzt. Diese Nutzung bringt jedoch Komfortnachteile im Vergleich mit Öl- oder Gasheizungssystemen mit sich, da die Brennstoffzufuhr bzw. Ascheabfuhr teilweise einen erhöhten Aufwand vom Nutzer erfordert.

Mit der Entwicklung des Holzpelletmarktes in Europa, entsprechender Brennstoffnormen sowie automatisierter Feuerungsanlagen für Holzpellets kann die Nutzung von Holz zur Wärmebereitstellung in Kleinfeuerungsanlagen ähnlich komfortabel wie bei Ölheizungssystemen - bei geringer Umweltbelastung - erfolgen. Holzpellets verbinden dabei die Vorteile

- einer definierten Qualität,
- geringer Umweltbelastung,
- unkomplizierter Transport (riesel- und blasfähig) und
- hoher Energiedichte im Vergleich zu anderen biogenen Festbrennstoffen sowie
- die Möglichkeit automatisierte Anlagentechnik einzusetzen.

Diese Vorteile, in Verbindung mit einem attraktiven Preis, haben in den letzten Jahren zu einer vermehrten Nutzung von Holzpelletsystemen geführt. Im Vergleich mit der Nutzung von Scheitholz oder Holzhackschnitzeln weist die Nutzung von Holzpellets zudem nur geringe Feinstaubemissionen auf.

Für die weitere Entwicklung dieses Marktes sind eine gesicherte Versorgungsstruktur, moderne Anlagentechnik sowie genormte Qualitätsanforderungen in Kombination mit konkurrenzfähigen Preisen notwendig.

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Bei der Herstellung und Nutzung von Holzpellets muss eine definierte Qualität sowohl beim Herstellungsprozess als auch beim Transport bis zum Endkunden sichergestellt werden, unabhängig welches Holz als Ausgangsmaterial verwendet wird. Bisher wird die Qualität von Holzpellets hauptsächlich über den Wasser- und Aschegehalt und den Abrieb<sup>1</sup> definiert. Um die Festigkeit der Holzpellets zu erhöhen und so den Abrieb gering zu halten, werden beim Pelletieren häufig Bindemittel zugegeben. Diese verringern zudem den Energieeinsatz beim Herstellungsprozess, da der Pressdruck verringert werden kann [Rommeiß, 2004]. Bisher wird dafür vor allem Mais- und Weizenstärke verwendet [Schlaug (Mann Naturenergie) u. a., 2006]. Von Seiten der Pelletproduzenten besteht Bedarf an alternativen Bindemitteln, um flexibel auf veränderte Marktbedingungen reagieren zu können. Bei Verwendung dieser Bindemittel muss allerdings auch deren möglicher Einfluss auf das Verbrennungs-, Emissions- und Ascheerweichungsverhalten der Holzpellets berücksichtigt werden.

Vereinzelte kommt es bei Verbrauchern zu Problemen durch Erweichung und Verkleben der Holzpelletaschepartikel<sup>2</sup>. Da die Feuerungstechnik in Holzpelletkesseln nicht für ein Erweichen konzipiert ist, kann die Luft- oder Brennstoffzufuhr blockiert werden, was bis zum Anlagenstillstand führen kann. Die weich gewordene Asche härtet beim Abkühlen aus, wodurch sie vom Verbraucher allein nicht immer zu entfernen ist. Bisher konnte keine einzelne Einflussgröße für die Ascheerweichung identifiziert werden, weshalb im Schadensfall häufig ein Komplettaustausch der Holzpellets erfolgte. Als mögliche Ursachen für die Erweichung der Asche kommen Presshilfsmittel, Holzart, Feuerungstechnik sowie Herstellungsverfahren in Betracht [Wirtgen u. a., 2006c].

---

<sup>1</sup>Feinanteil, der bei mechanischer Belastung entsteht

<sup>2</sup>übliche Erweichungstemperatur für Asche von Holzpellets: 1300 – 1400 °C



Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes vom Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Leipzig, des Lehr- und Forschungsgebiet für Kokereiwesen, Brikettierung und Thermische Abfallbehandlung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen und der Mann Naturenergie GmbH & Co. KG wird daher die Herstellung und thermische Nutzung von Holzpellets sowie die Optimierung der Herstellungs- und Nutzungsprozesse untersucht. Weiterhin werden Untersuchungen zur Qualitätssicherung für Transport, Handling und Lagerung von Holzpellets sowie Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen durchgeführt.

Als Teil dieses Projektes werden in dieser Diplomarbeit die Einflüsse von verschiedenen Presshilfsmitteln auf die Verbrennungs- und Emissionseigenschaften von Holzpellets untersucht. Gleichzeitig wird auch der Einfluss unterschiedlicher Feuerungssysteme betrachtet. Bei den Verbrennungseigenschaften steht das Abbrandverhalten und die Ascheerweichung im Vordergrund, um Zusammenhänge zwischen Presshilfsmittelart und -gehalt sowie der Feuerungstechnik zu erkennen. Dafür werden umfangreiche Verbrennungsversuche mit verschiedenen Pelletchargen an zwei handelsüblichen Feuerungssystemen im Technikum des Institutes für Energetik und Umwelt in Leipzig durchgeführt. Als Bewertungskriterien für das Emissionsverhalten werden Kohlenmonoxid-, Stickoxid-, Gesamtkohlenstoff- sowie Staubgehalt im Abgas gemessen. Die Bewertung der Verbrennungsverhaltens erfolgt durch Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrad und des Luftüberschusses. Um ein mögliches Erweichen der Asche zu untersuchen, werden kontinuierliche Temperaturmessungen in den Glutbereichen der Feuerstätten vorgenommen.

Ziel der Diplomarbeit ist es, die Einflüsse von Presshilfsmitteln, Pelletqualität (Feinanteil, Stückigkeit) und Feuerungsprinzip auf das Emissionsverhalten ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , TOC, Staub), den Anlagenbetrieb (Brennstoffförderaten, Abgasverluste, Luftüberschuss) und die Ascheerweichung zu erkennen und zu bewerten. Für die entsprechenden Verbrennungsversuche stehen zwei, in Deutschland weit verbreitete, Feuerungsanlagen für Holzpellets zur Verfügung:

- Pelletti II SR 203 mit Unterschubfeuerung und 20 kW thermischer Leistung der Fa. Paradigma Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG und
- Vitolig 300 VL3A mit Abwurfffeuerung (Brennerschale) und einer thermischen Leistung von 4,3 bis 15,0 kW der Fa. Viessmann Werke GmbH & Co. KG.

Beide Anlagen werden parallel mit verschiedenen Pelletchargen betrieben, die sich jeweils durch Art und Menge des verwendeten Presshilfsmittels (PHM) unterscheiden. Aus Vorversuchen sind folgende Presshilfsmittel ausgewählt worden:

1. konventionelle Maisstärke,
2. Weizenstärke,
3. Kartoffelstärke,
4. Roggenmehl und
5. Maisstärke, thermisch modifiziert.

Die mit diesen Presshilfsmitteln hergestellten Pellets werden in beiden Feuerungsanlagen verbrannt, um die Einflussfaktoren Presshilfsmittel, Pelletqualität und Feuerungsprinzip zu untersuchen.

Nachfolgend werden in Kapitel 2 die Nutzungsaspekte, Eigenschaften und Herstellung von Holzpellets erläutert. Weiterhin wird auf die Grundlagen der Verbrennung biogener Festbrennstoffe und die Feuerungsanlagentechnik eingegangen. In Kapitel 3 werden die verwendeten Brennstoffe und deren Eigenschaften sowie die verwendeten Feuerungsanlagen im Detail beschrieben. Zudem wird auf den Versuchsaufbau und Ablauf eingegangen. Die Darstellung und Auswertung der durchgeführten Versuche und Messungen erfolgt in Kapitel 4. Die Schlussfolgerungen und Zusammenfassung der Diplomarbeit sind abschließend in Kapitel 5 aufgeführt. Im Anhang sind Qualitätsanforderungen an Holzpellets durch Normen sowie emissionsrechtliche Anforderungen an Kleinfeuerungsanlagen für Holzpellets aufgeführt. Darüber hinaus sind die Grundlagen der Verbrennungsrechnung, die technischen Daten der Feuerungsanlagen sowie die Analysedaten der Brennstoffe hinterlegt. Abschließend sind noch umfangreiche Messdaten aus den Verbrennungsversuchen aufgeführt.

# 2 Grundlagen und Stand der Technik

## 2.1 Holzpellets

### 2.1.1 Nutzungsaspekte

Als Holzpellets werden Presslinge aus Holz bezeichnet. Für die Herstellung können Holzreststoffe (z.B. Sägespäne und Sägemehl aus der holzbe- und verarbeitenden Industrie), Waldresthölzer (z.B. aus der Forstwirtschaft) oder Energiepflanzen (z.B. Weiden/Pappeln von Kurzumtriebsplantagen) verwendet werden. In Deutschland genutzte Holzpellets werden zur Zeit aus Holzreststoffen hergestellt [Witt und Thrän, 2005].

Die Merkmale von Festbrennstoffen lassen sich nach Hartmann [2001] in die Kategorien *Elementargehalte*, *energieträgerspezifische Eigenschaften* sowie *physikalisch-mechanische Eigenschaften* einteilen. Erläuterungen zu diesen Qualitätsmerkmalen, bezogen auf Holzpellets, sind in den folgenden Abschnitten aufgeführt.

Allgemein zeichnen sich Holzpellets gegenüber anderen biogenen Festbrennstoffen, wie Scheitholz oder Holzhackschnitzel, durch folgende Vorteile aus [Nussbaumer, 2002]:

- homogene Brenneigenschaften,
- geringe Feuchte,
- hoher Heizwert,
- geringes Transport- und Lagervolumen,
- gute Dosierbarkeit (damit teillastfähig),
- riesel- und blasfähig,

- automatische Zündung möglich.

Neben diesen vorteilhaften Eigenschaften der Holzpellets müssen aber gewisse Nachteile in Kauf genommen werden [Nussbaumer, 2002]:

**Hygroskopisch:** Holzpellets quellen bei direktem Kontakt mit Wasser auf, verlieren ihre Bindungsfähigkeit und zerfallen. Eine trockene Lagerung ist deshalb essentiell.

**Erhöhter Herstellungsaufwand:** Im Vergleich zu Scheitholz oder Holzhackschnitzeln sind zusätzliche (großtechnische) Produktionsschritte wie Zerkleinern, Konditionieren, Pressen und Abkühlen notwendig.

**Verfügbarkeit:** Die Herstellung von Holzpellets erfolgt großtechnisch. Dadurch kann die lokale Verfügbarkeit im Vergleich zu Scheitholz geringer sein.

Die Nutzung von Holzpellets in Deutschland erfolgt überwiegend in Kleinf Feuerungsanlagen [Witt und Thrän, 2005]. Aufgrund dieser Verbrauchsstruktur wurde aus der österreichischen ÖNORM M 7135 [2000] und der deutschen DIN 51731 [1996] die DINplus [2002] entwickelt, da Kleinanlagen auf eine definierte Brennstoffqualität angewiesen sind. Wesentliche Brennstoffeigenschaften, wie Geometrie, Zusammensetzung und Heizwert sind in der DINplus festgelegt. Sie dient heute als Standard für Holzpellets zur Nutzung im Privatbereich. Im weiteren werden deshalb die Anforderungen der DINplus als Basis für Erläuterungen zu den Eigenschaften betrachtet.

Eine komplette Übersicht der Anforderungen von ÖNORM M 7135 [2000], DIN 51731 [1996] sowie DINplus [2002] ist im Anhang B zu finden.

### 2.1.2 Elementargehalte

Feste Biomassen bestehen im Wesentlichen aus den Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>). Der Hauptteil, der bei der Verbrennung freiwerdenden Energie, stammt aus der Oxidation von Kohlenstoff und Wasserstoff. Darüber hinaus können noch Elemente wie Schwefel (S), Stickstoff (N), Chlor (Cl), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Schwermetalle (z.B. Blei (Pb), Zink (Zn), Cadmium (Cd)) enthalten sein, die erheblichen Einfluss auf das Verbrennungs- und Emissionsverhalten haben können (siehe Abschnitt 2.2).

Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht der in Holzbrennstoffen vorkommenden Elemente sowie typische Größenordnungen.

**Tabelle 2.1:** *Elementarzusammensetzung und typische Größenordnung der Elemente bei Holzbrennstoffen nach Hartmann u. a. [2003a]*

Element	Abhängigkeiten	typische Größenordnung bei holzartigen Brennstoffen (in % der TM)
Kohlenstoff	Holzart	47 bis 50
Wasserstoff	Holzart	5 bis 7
Sauerstoff*	Holzart	40 bis 45
Stickstoff*	Holzart und Düngung	0,10 bis 0,50
Chlor	Holzart und Düngung	< 0,02
Schwefel	Holzart und Düngung	< 0,10
Kalium	Holzart und Düngung	0,13 bis 0,35
Kalzium		0,04 bis 0,10
Magnesium	Holzart und Düngung	0,30 bis 0,70
Phosphor		< 0,10
Schwermetalle (z.B. Pb, Zn, Cd)	Wachstumszeit, Bodenbelastung	unterschiedlich, generell bei langjährig wachsenden Hölzern und in der Rinde höher

*\* im Brennstoff*

Je nach Rohstoff, der für die Herstellung der Pellets verwendet wurde, können die angegebenen Elemente unterschiedlich stark enthalten sein. Die Auswirkungen der jeweiligen Elemente sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

**Tabelle 2.2:** *Auswirkungen der Elementargehalte biogener Festbrennstoffe nach Thrän u. a. [2004], Obernberger [1997], Vetter [2001] und Hartmann [2001]*

Element	Auswirkung
Stickstoff* (N)	NO <sub>x</sub> -, HCN- und N <sub>2</sub> O-Emissionen
Kalium (K)	Ascheerweichungsverhalten, Hochtemperaturkorrosion
Magnesium (Mg), Kalzium (Ca)	Ascheerweichungsverhalten, Ascheeinbindung von Schadstoffen, Ascheverwertung
Schwefel* (S)	SO <sub>x</sub> -Emissionen, Hochtemperaturkorrosion
Chlor* (Cl)	Emission von HCl und halogenorganischen Verbindungen (z.B. PCDD <sup>1</sup> /PCDF <sup>2</sup> ), Hochtemperaturkorrosion
Schwermetalle	Ascheverwertung, Schwermetallemission, zum Teil katalytische Wirkung (z.B. bei PCDD/PCDF-Bildung)

\* in der Regel bei Holz(pellets) nur in geringen Mengen enthalten (siehe Tabelle 2.1)

<sup>1</sup> polychlorierte Dibenzo-*p*-dioxine (Dioxine)

<sup>2</sup> polychlorierte Dibenzofurane

### 2.1.3 Energieträgerspezifische Eigenschaften

Als energieträgerspezifische Eigenschaften gelten die Brennstoffmerkmale, die bei der thermischen Nutzung von besonderem Interesse sind. Dazu zählen nach Hartmann [2001]

- Wassergehalt,
- Heizwert,
- flüchtige Bestandteile und
- Aschegehalt sowie
- Ascheerweichungspunkt.

**Wassergehalt/Brennstofffeuchte:** Der Wassergehalt  $w$  gibt an, welcher Anteil Wasser im Brennstoff enthalten ist, bezogen auf die Summe aus Masse an trockenem

Brennstoff  $m_B$  und enthaltener Wassermenge  $m_W$  (Gl. 2.1) [Hartmann u. a., 2003a].

$$w = \frac{m_w}{m_B + m_w} = \frac{u}{1 + u} \quad (2.1)$$

Die Brennstofffeuchte  $u$  gibt an welcher Anteil Wasser, bezogen auf den trockenen Brennstoff, enthalten ist (Gl. 2.2). Damit kann die Brennstofffeuchte auch Werte über 100 % annehmen [Hartmann u. a., 2003a].

$$u = \frac{m_w}{m_B} = \frac{w}{1 - w} \quad (2.2)$$

Zum Vergleich sind in Tabelle 2.3 die Wassergehalte einiger Festbrennstoffe dargestellt.

**Tabelle 2.3:** Wassergehalt verschiedener Festbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets nach Hartmann u. a. [2003a]

Brennstoff	Wassergehalt
	in %
Holz, waldfrisch <sup>1</sup>	45-60
Holz, lufttrocken <sup>2</sup>	12-18
Hackschnitzel Buche,	15 (trocken)
Fichte trocken	30 (beschränkt lagerfähig)
Halmgut (z.B. Stroh)	15
Scheitholz	15 (lufttrocken)
	30 (sommertrocken)
Holzpellets (DINplus)	max. 10

<sup>1</sup> abhängig von Baumart, Alter und Jahreszeit

<sup>2</sup> abhängig von der Jahreszeit

Der Wassergehalt der Holzpellets wird durch die Prozessführung bei der Herstellung beeinflusst. Für Holzpellets, die konform zur DINplus sein sollen, gilt ein maximaler Wassergehalt von 10 % (siehe DINplus [2002] bzw. Tabelle B.1 im Anhang B) Es ist darauf zu achten, dass die Pellets trocken gelagert werden, da Holz

hygroskopische Eigenschaften besitzt und die Pellets unter direktem Feuchteinfluss ihre Bindungseigenschaften verlieren. Zusätzlich fördert eine hohe Feuchte den biologischen Zersetzungsprozess.

**Heizwert:** Unter dem Heizwert versteht man die maximal bei der Verbrennung freierwerdende Wärmemenge, bezogen auf die gleiche Temperatur der Ausgangsstoffe und Reaktionsprodukte<sup>1</sup> [ZIV, 1999]. Dabei wird unterschieden, ob der im Abgas enthaltener Wasserdampf kondensiert (entspricht dem Brennwert eines Brennstoffes) oder dampfförmig bleibt (entspricht dem Heizwert eines Brennstoffes). Der Einfluss des Wassergehaltes auf den Heizwert innerhalb einer Brennstoffklasse (z.B. Holzbrennstoffe) ist wesentlich stärker als die Art der verwendeten Biomasse. Wie der Wassergehalt ist auch der Heizwert der Holzpellets normiert (siehe Tabelle B.1). Im Vergleich zu Holzpellets sind in Tabelle 2.4 die Heizwerte einiger Festbrennstoffe dargestellt.

**Tabelle 2.4:** Heizwert  $H_{u,wf,(m)}$  verschiedener Festbrennstoffe im Vergleich mit Holzpellets nach Hartmann u. a. [2003a]

Brennstoff	Heizwert $H_{u,wf,(m)}$ in MJ/kg
Steinkohle	$\approx 29,7$
Braunkohle	$\approx 20,6$
Holzpellets	$\approx 18,0$
Stroh <sup>1</sup>	$\approx 17,3$
Rapskörner	$\approx 26,5$
Fichtenholz (mit Rinde)	$\approx 18,8$
Pappelholz (Kurzumtrieb)	$\approx 18,5$

Da der Brennstoff in der Realität immer eine gewisse Feuchtigkeit aufweisen wird, muss eine entsprechende Energiemenge eingesetzt werden, um das Wasser während der Verbrennung zu verdunsten. Diese Energie wird dem Verbrennungsprozess entzogen und mindert die Energieausbeute, sofern keine Abgaskondensation erfolgt. Mittels Gl. 2.3 lässt sich der Heizwert  $H_{u,f,(m)}$  des feuchten Brennstoffes in Abhängigkeit vom Wassergehaltes  $w$  aus dem Heizwert  $H_{u,wf,(m)}$  des trockenen Brennstoffes (bei 298 K) berechnen [Hartmann u. a., 2003a].

---

<sup>1</sup>in der Regel 298 K



$$w = \frac{H_{u,wf,(m)} \cdot (100 - w) - 2,44 \cdot w}{100} \quad (2.3)$$

Der Faktor 2,44 berechnet sich aus der Verdampfungswärme des Wassers. Für Holzpellets ergibt sich mit dem trockenen Heizwert aus Tabelle 2.4 und Gl. 2.3 z.B.

$$w = 20 \% \Rightarrow H_{u,f,(m)} = 13,91 \text{ MJ/kg} \quad (2.4)$$

$$w = 50 \% \Rightarrow H_{u,f,(m)} = 7,78 \text{ MJ/kg} \quad (2.5)$$

Bei festen und flüssigen Brennstoffen kann der Heizwert nur in einem Kalorimeter genau bestimmt werden. Allerdings lässt sich mit den Ergebnissen aus der Elementaranalyse der Heizwert für feste und flüssige Brennstoffe mit einer Näherungsgleichung nach BOIE [ZIV, 1995] ermitteln.

Für feste Brennstoffe gilt Gleichung 2.6, für flüssige Gleichung 2.7. Mit  $\mu$  werden die jeweiligen Massenanteile (Angabe in Mass.-%) im Brennstoff bezeichnet.

$$H_{u,f,(m)} = 34,83 \mu_C + 93,85 \mu_H + 6,28 \mu_N - 10,80 \mu_O - 2,45 \mu_w \quad (2.6)$$

$$H_{u,(m)} = 35,16 \mu_C + 94,19 \mu_H + 10,47 \mu_S - 10,47 \mu_O \quad (2.7)$$

**Flüchtige Bestandteile:** Als flüchtige Bestandteile bezeichnet man den Brennstoffanteil der organischen Brennschubstanz, der durch Zersetzungsprozesse beim Erhitzen unter Luftabschluss entsteht. Die flüchtigen Bestandteile setzen sich meist aus brennbaren Gasen (z.B. CO oder H<sub>2</sub>) zusammen. Ein hoher Anteil an flüchtigen Bestandteilen wirkt positiv auf das Entzündungsverhalten. Brennstoffe, die einen hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen aufweisen, lassen sich in der Regel gut für die Vergasung nutzen. Umgekehrt proportional zum Anteil an flüchtigen Bestandteilen verhält sich der Kohlenstoffanteil der organischen Brennstoffsubstanz. Generell weisen Biobrennstoffe einen sehr hohen Anteil an flüchtigen Bestandteilen auf (Tabelle 2.5), damit eignen sie sich gut für die Vergasung.

**Ascheanteil:** Als Asche bezeichnet man die nicht brennbaren mineralischen Rückstände, die bei der Verbrennung eines Brennstoffes entstehen (vgl. Abbildung 2.4, Seite 21). Der Ascheanteil hat wesentlichen Einfluss auf die entstehenden

**Tabelle 2.5:** *Durchschnittlicher Gehalt an flüchtigen Bestandteilen bei verschiedenen Brennstoffen (Daten aus [Hartmann u. a., 2003b], [Kneer, 2006] und [ZIV, 1995])*

Brennstoff	Anteil flüchtiger Bestandteile in % der TM
Holzbrennstoffe	$\approx 82$
Getreidestroh	$\approx 76$
Wiesenheu	$\approx 74$
Braunkohle	$\approx 52 - 54$
Steinkohle	$\approx 5 - 48$
Torf	$\approx 60$

Partikelemissionen bei der Verbrennung. Im Zusammenhang mit dem Ascheerweichungsverhalten spielt der Ascheanteil auch eine Rolle bei Ascheerweichung in Feuerungsanlagen.

**Ascheerweichungspunkt:** Als Ascheerweichungspunkt wird die Temperatur bezeichnet, bei der die beim Verbrennungsprozess entstehende Asche weich wird und verklebt („versintert“). Bei entsprechend hohen Temperaturen kann es sogar zu einem Fließen der Asche kommen. Durch das Erweichen kann der Brennstofftransport, die Luftzufuhr und auch die Ascheabfuhr gestört werden, was bis zum Anlagenstillstand führen kann [Hartmann u. a., 2003c]. Beim Abkühlen verfestigt sich die Asche wieder, teilweise so stark, dass sie nur mit erheblichem Aufwand entfernt werden kann.

Bei Verwendung von Brennstoffen mit niedrigem Ascheerweichungspunkt sind Zusatzeinrichtungen wie wassergekühlte Rostsysteme, Rauchgasrückführungen oder spezielle Brennerkonstruktionen notwendig, um die Temperatur niedrig zu halten oder die weiche Asche anderweitig abzutransportieren. Allerdings sind solche Systeme mit einer Kostensteigerung verbunden. Da bei verringerter Temperatur nicht immer eine höhere Verweilzeit der Verbrennungsgase realisiert werden kann, ist eine Erhöhung des Schadstoffausstoßes möglich, da die Verbrennungsreaktionen bei geringerer Temperatur langsamer ablaufen [Hartmann u. a., 2000] (siehe Abschnitt 2.2).

Die Analyse des Ascheerweichungsverhaltens kann mittels DIN 51730 [1998] erfolgen. Für die Bestimmung des Ascheverhaltens, wird diese zu einem würfelförmigen Probenkörper gepresst, der dann nach einem definierten Temperaturverlauf

erwärmt wird. Durch die Erwärmung verändert sich die Form des Probekörpers, was sich nach [Thrän u. a., 2004] mit folgenden vier Zuständen beschreiben lässt:

**Sinterbeginn**  $\Rightarrow$  Zusammenkleben einzelner Ascheteilchen, Veränderung der Form des Probekörpers ist möglich

**Erweichungstemperatur**  $\Rightarrow$  Erweichen der Asche (z.B. Abrundung der Kanten), beginnendes Blähen des Probekörpers

**Halbkugeltemperatur**  $\Rightarrow$  Probekörper nähert sich Halbkugelform an; geschmolzener Probekörper ist halb so hoch wie seine Grundlinie

**Fließtemperatur**  $\Rightarrow$  Probekörper ist auf ein Drittel seiner ursprünglichen Höhe auseinandergefließen

Haupteinflussgröße auf das Erweichungsverhalten der Asche ist deren Zusammensetzung. Diese wird im Fall von Holzpellets durch die verwendete Baumart und eventuelle Zuschlagstoffe beeinflusst. Der Erweichungspunkt von Holz mit Rinde liegt im Bereich von 1300 °C bis 1400 °C [Hartmann u. a., 2003c] und ist damit für die meisten Kleinfeuerungsanlagen, die mit Temperaturen bis etwa 1100 °C arbeiten, unkritisch. Vereinzelt kommt es in der Praxis dennoch zur Erweichung der Asche von Holzpelletfeuerungen, deren Ursache bisher nicht eindeutig geklärt werden konnte.

In Untersuchungen von Hartmann u. a. [2000] wurden verschiedene Brennstoffe u.a. hinsichtlich ihres Ascheschmelzverhaltens untersucht. Dabei wurde eine Berechnungsmöglichkeit für den Sinterbeginn  $\vartheta_{SB}$ , den Erweichungspunkt  $\vartheta_{EP}$  und den Fließpunkt  $\vartheta_{FP}$  der Asche ermittelt. Es ergaben sich Schätzfunktion für die jeweilige Temperatur in Abhängigkeit vom Kalium- (K), Calcium- (Ca) und Magnesiumgehalt (Mg) (Gl. 2.8, 2.9 und 2.10).

$$\vartheta_{SB} = 1159 - 58,7 K + 237,9 Ca - 743,8 Mg \quad (2.8)$$

$$\vartheta_{EP} = 1172 - 53,9 K + 252,7 Ca - 788,4 Mg \quad (2.9)$$

$$\vartheta_{FP} = 1369 - 43,4 K + 192,7 Ca - 698,0 Mg \quad (2.10)$$

Die Kenndaten dieser Schätzfunktionen sind in Tabelle 2.6 zusammengestellt.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Datenbasis, die zur Ermittlung dieser Funktionen geführt hat und des geringen Bestimmtheitsmaßes ist die Aussagekraft hinsichtlich der Ascheerweichung allerdings begrenzt.

**Tabelle 2.6:** *Kenndaten der Schätzfunktionen zur Berechnung des Sinterbeginns, des Erweichungspunktes und des Fließpunktes für Aschen biogener Festbrennstoffe nach Hartmann u. a. [2000]*

	Anzahl Beobachtungen	Bestimmtheitsmaß	Standardfehler
		$R^2$	in °C
$\vartheta_{SB}$	57	0,58	84,8
$\vartheta_{EP}$	67	0,60	88,2
$\vartheta_{FP}$	67	0,38	111,0

Die unterschiedlichen Einflüsse der energieträgerspezifischen Eigenschaften sind in Tabelle 2.7 zusammengefasst.

**Tabelle 2.7:** *Einflussmöglichkeiten energieträgerspezifischer Eigenschaften biogener Festbrennstoffe nach [Hartmann, 2001]*

Eigenschaft	Einfluss
Wassergehalt	Heizwert, Lagerfähigkeit, Verluste, Selbstentzündung Brennstoffgewicht, Verbrennungstemperatur
Heizwert	Anlagenauslegung
Aschegehalt	Partikelemission (Staub), Rückstandsbildung und -verwertung
Ascherweichungspunkt	Schlackebildung und -ablagerung, Betriebssicherheit und -kontinuität, Wartungsbedarf

## 2.1.4 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

Nach Hartmann [2001] lassen sich

- Stückigkeit (Abmessungen, Geometrie),
- Größenverteilung/Feinanteil,
- Brückenbildungsneigung,
- Rohdichte/Schüttdichte und
- Abriebfestigkeit

als wesentliche physikalisch-mechanische Eigenschaften definieren.

**Stückigkeit:** Je nach Brennstoffstückigkeit sind spezielle Aufbereitungs-, Transport- und Feuerungstechniken nötig. Bei Holzpellets ist die Stückigkeit durch geometrischen Abmessungen entsprechender Normen (z.B. DINplus [2002]) weitgehend bestimmt. Damit sind standardisierte Transport- und Feuerungstechniken möglich.

**Größenverteilung/Feinanteil:** Die Größenverteilung der einzelnen Brennstoffteilchen und der vorhandene Feinanteil können maßgeblichen Einfluss auf die Förderrate eines Brennstoffes haben. Bei Holzpellets ist die Geometrie zwar durch die Norm vorgegeben, allerdings werden sowohl Größenverteilung, Längenverteilung als auch Feinanteil durch die Zugabe von Bindemitteln beeinflusst (siehe Abschnitt 4.1).

**Brückenbildungsneigung:** Bei automatischer Entnahme eines Brennstoffes aus einem Silo oder Lagerbehälter durch Fördereinrichtungen können sich Hohlräume bilden, wodurch der Brennstofftransport gestört werden kann. In der Praxis kann die Brückenbildung durch aktive Fördersysteme<sup>1</sup> oder entsprechend angepasste Lagerräume gesenkt werden [Hartmann u. a., 2003c]. Bei Holzpellets kommt es aufgrund ihrer genormten Geometrie in der Regel zu keinen Problemen durch Brückenbildung.

**Rohdichte/Schüttdichte:** Über die Rohdichte wird maßgeblich der Heizwert bestimmt. Nach Hartmann u. a. [2003a] werden darüber hinaus die Wärmeleitfähigkeit, Entgasungsrate, Schüttdichte sowie Fördereigenschaften der Holzpellets von ihr beeinflusst. Die Rohdichte kann nur bei der Herstellung von Holzpellets gezielt beeinflusst werden, damit dient sie auch als Qualitätsmerkmal für den Herstellungsprozess. Zum Vergleich sind in Tabelle 2.8 die Schütt- bzw. Stapeldichten sowie der Heizwert einiger Biobrennstoffe aufgeführt. Holzpellets erreichen aufgrund des Herstellungsprozesses sowohl eine hohe Dichte als auch einen hohen Heizwert (siehe Tabelle 2.8). Damit sind kleinere Lagerräume im Vergleich mit anderen festen, biogenen Brennstoffen möglich.

**Abrieb:** Unter Abrieb wird der, bei mechanischer Belastung entstehende, Feinanteil bei Holzpellets verstanden. Im Rahmen dieser Arbeit wird darunter der Anteil an Partikeln  $< 3,15$  mm verstanden<sup>2</sup>. Der Abrieb ist durch die DINplus auf 2,3 % der Ausgangsmasse begrenzt [DINplus, 2002]. Als Richtwert in der Pelletproduktion gilt etwa 1,4 % [Wirtgen u. a., 2006a]. Ein hoher Abrieb kann zu Verstopfungen der Fördereinrichtungen sowie zu Funktionsstörungen der Feuerungsanlage

---

<sup>1</sup>z.B. Rüttelsysteme

<sup>2</sup>siehe DIN CEN/TS 15149-2:2006-04 [2006]

**Tabelle 2.8:** Schütt- bzw. Stapeldichten und Heizwert von Biobrennstoffen bei 15% Wassergehalt nach Hartmann u. a. [2003a] und Thrän u. a. [2004]

Brennstoff		Schütt-/Stapeldichte in kg/m <sup>3</sup>	Heizwert $H_{u(w)}$ in MJ/kg
Scheitholz (gestapelt)	Buche	460	15,3
	Fichte	310	15,5
Hackschnitzel	Buche	260	15,3
	Fichte	195	15,5
Holzpellets		650	17,0
Stroh	Quaderballen	140	14,5
	Häckselsgut	65	
Getreidekörner	Roggen		17,1
	Weizen	760	17,0
	Triticale		16,9

führen. In den meisten Anlagen werden Förderschnecken für den Brennstofftransport eingesetzt. Bei diesen findet ab einem gewissen Feinanteil kein Transport mehr statt, da die Partikel an den Gewindegängen der Förderschnecke vorbeirutschen. Zusätzlich erhöhen sich durch einen hohen Feinanteil die Staubemissionen und der Flugascheanteil [Hartmann u. a., 2003c] [Hartmann, 2001]. Darüber hinaus können durch einen hohen Feinanteil auch Belästigungen des Nutzers bei der Brennstoffanlieferung auftreten. Um die Abriebfestigkeit zu erhöhen, können nach DINplus max. 2 % an Bindemitteln zugegeben werden. Diese Bindemittel werden als Presshilfsmittel bezeichnet. Als Presshilfsmittel dürfen nach DINplus [2002] nur

„(...) chemisch nicht veränderte Produkte aus der primären land- und forstwirtschaftlichen Biomasse (...)“

verwendet werden, z.B. Maisstärke und Roggenmehl. Zur Herstellung von Holzpellets werden überwiegend Mais- und Weizenstärke verwendet [Schlaug (Mann Naturenergie) u. a., 2006]. Diese haben direkten Einfluss auf die Festigkeit der Holzpellets und damit auf den Abrieb. Die Festigkeit wiederum kann auch Einfluss auf die Brenneigenschaften, z.B. Wärmeleitfähigkeit oder Entgasungsrate, haben [Hartmann u. a., 2003a].

Die Auswirkungen der jeweiligen physikalisch-mechanischen Eigenschaften von

Holzpellets sind in Tabelle 2.9 zusammengefasst.

**Tabelle 2.9:** *Einflussmöglichkeiten physikalisch-mechanischer Eigenschaften biogener Festbrennstoffe nach Hartmann [2001]*

Eigenschaft	Einfluss
Stückigkeit	Förder- und Feuerungssystem, Aufbereitungsbedarf
Größenverteilung/ Feinanteil	Förderrate, Transportfähigkeit, Brückenbildungsneigung Staubentwicklung
Brückenbildungsneigung	Transportfähigkeit
Rohdichte/ Schüttdichte	Schüttdichte, Förderrate, Brenneigenschaften Transportfähigkeit, Lagerbedarf
Abriebfestigkeit	Feinanteil, Normenkonformität

### 2.1.5 Herstellung

Seine Ursprung hat die Pelletierungstechnik im Bereich der Futtermittelherstellung. In Europa ist sie seit den 80er/90er-Jahren zur Brennstoffherstellung im Einsatz [Witt u. a., 2006]. Für die Nutzung als Brennstoff in Kleinfeuerungsanlagen wurden verschiedene nationale Regelwerke entwickelt, um eine einheitliche Qualität der Holzpellets sicherzustellen (z.B. ÖNORM M 7135 [2000] in Österreich oder DINplus [2002] und DIN 51731 [1996] in Deutschland). An diesen Qualitätsanforderungen kann sich der Pellethersteller orientieren, wenn Holzpellets für den Privatverbraucher hergestellt werden sollen. Dies erfordert den Einsatz entsprechender Rohstoffe und Verfahren.

Als Rohstoff für die die Herstellung von Holzpellets wird in Deutschland zum größten Teil Sägerestholz verwendet (Abbildung 2.1), einige Hersteller setzen bereits Waldrestholz ein [Witt und Thrän, 2005]. Für Sägerestholz lässt sich die Herstellung in folgende Schritte einteilen [Möbius, 2006]:

- Trocknen des Ausgangsmaterials,
- Zerkleinern,
- Pelletieren,
- Abkühlen und
- Lagern.



**Abbildung 2.1:** Sägerestholz als Rohstoff zur Holzpelletherstellung, Pelletwerk der Mann Naturenergie GmbH & Co. KG Langenbach [Witt, 2006a]

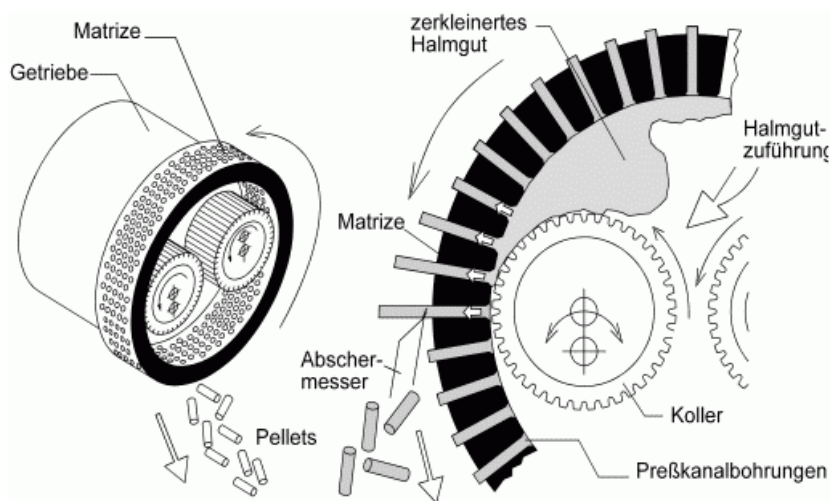
**Trocknung:** Für die Verarbeitung der Rohstoffe ist eine Trocknung auf 10 – 14 % Wassergehalt notwendig [Möbius, 2006]. Bei frischem Hackgut schwankt die Feuchte zwischen 25 – 40 % (Sommer) und 45 – 50 % (Winter) [Hartmann u. a., 2003b]. Die Trocknung erfordert im gesamten Herstellungsprozess den größten Energieaufwand. Der Energieaufwand zur Herstellung von Pellets aus sehr feuchten Rohstoffen ist dadurch wesentlich energieintensiver.

**Zerkleinern:** Damit der Rohstoff in den nächsten Prozessschritten gut verarbeitet werden kann, ist eine Zerkleinerung auf durchschnittlich 2 mm notwendig. Dadurch ist außerdem eine bessere Verteilung und Wirkung von Presshilfsmitteln (PHM) oder anderen Zusatzstoffen möglich.

**Pelletieren/Konditionieren:** Vor dem Pelletieren werden die zerkleinerten Späne im Reifebunker durch Wasser- oder Dampfzugabe konditioniert. Durch die Dampfzugabe erhöht sich die Temperatur auf ca. 130 °C [Möbius, 2006], dadurch werden die Holzteilchen aufgeschlossen und das im Holz enthaltene Lignin verflüssigt. Die klebrig-harzige Konsistenz des flüssigen Lignins wird hierbei ausgenutzt, um die natürlichen Bindungseigenschaften zwischen den Holzpartikeln zu vergrößern. Eventuelle PHM werden ebenfalls zugegeben und fördern das Verkleben der Holzpartikel. Nach etwa 15 – 20 min hat sich ein gleichmäßiger Feuchtegehalt in den Spänen eingestellt. Dann werden sie zur Pelletierung transportiert. Beim Pelletierungsprozess wird das konditionierte Ausgangsmaterial über Walzen durch eine Ring- oder Flachmatrize gepresst (Abbildung 2.2). Für einen optimalen Ablauf



des Pressvorganges können u.a. Druck und Temperatur variiert werden. Nach Möbius [2006] sind Pressdrücke von 800 bar<sup>1</sup> üblich. Die Koller werden beim Pelletieren gekühlt, um den Materialverschleiß zu verringern.



**Abbildung 2.2:** Arbeitsweise einer Kollergangpresse mit Ringmatrize [FNR, 2005]

Geht man von einer Schüttdichte von 170 kg/m<sup>3</sup> für Sägespäne als Rohstoff [Hartmann u. a., 2003a] und 650 kg/m<sup>3</sup> (Tabelle 2.8) für Holzpellets aus, ergibt sich eine Volumenreduzierung durch den Pressvorgang um rund 74 % bei gleich bleibender Masse. Durch die Erhöhung der volumetrischen Energiedichte verringert sich der Platzbedarf für die Lagerung. Zusätzlich sind die Pellets damit sehr gut transportierbar.

**Abkühlen:** Nach dem Pressen werden die Pellets gekühlt, damit sich das enthaltene Lignin verfestigen kann. Dadurch gewinnen die Pellets ihre endgültige Festigkeit. Zusätzlich werden sie gesiebt, um beim Pressen entstandenen Feinanteil oder Bruch abzutrennen. Dieser wird gemahlen und wieder in den Produktionsprozess zurückgeführt.

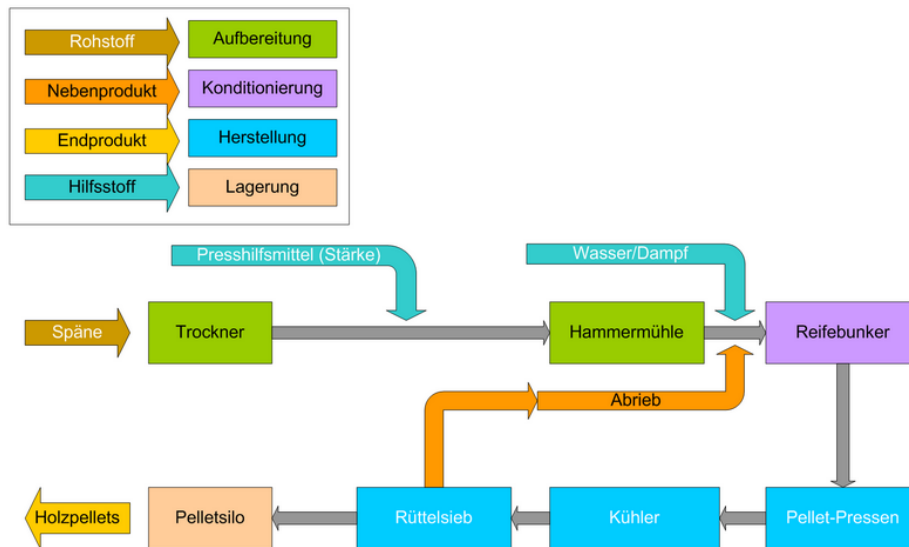
**Lagerung:** Je nach Kunden- bzw. Herstellervorgaben werden die Pellets noch für den Transport vorbereitet. Grundsätzlich ist ein Transport als lose Ware, per Big-Bag<sup>2</sup> oder als Sackware<sup>3</sup> möglich.

In Abbildung 2.3 ist der Herstellungsprozess zur Übersicht schematisch dargestellt.

<sup>1</sup>entspricht  $8 \cdot 10^7$  Pa

<sup>2</sup>500 – 1000 kg

<sup>3</sup>ca. 15 kg



**Abbildung 2.3:** Schema einer Pelletierungsanlage [Wirtgen u. a., 2006b]

Nach Witt [2006b] kann für die Prozessführung bei der Holzpelletherstellung von einem Elektroenergieeinsatz von 120 kWh/t Holzpellets ausgegangen werden (normal feuchter Rohstoff). Dies wären bei einem Energieinhalt der Pellets von 4.900 kWh/t etwa 2,45 %. Allerdings kann bei sehr feuchtem Rohstoff noch Energie für die Trocknung benötigt werden. Nach Daten von ProBas [2007] ergibt sich für im Jahr 2000 in Deutschland hergestellte Holzpellets ein kumulierter Energieaufwand (KEA) von insgesamt 1,0668 TJ pro TJ Energiegehalt von Holzpellets, darin enthalten ist ein erneuerbarer KEA von 1,01 TJ/TJ. Damit ergibt sich ein nicht erneuerbarer Energieaufwand von 0,0568 TJ/TJ für die Herstellung. Für die Produktion von Holzpellets (inklusive Aufwand für Transport und Produktionsmittel) werden also rund 5,3 % des Energiegehaltes der Holzpellets benötigt.

## 2.2 Verbrennung biogener Festbrennstoffe

Nachfolgend werden die wesentlichen Begriffe und Definition, die bei der thermochemischen Nutzung von Festbrennstoffen auftreten, erläutert. Darüber hinaus werden der Ablauf des Verbrennungsprozesses bei festen Brennstoffen und die Schadstoffbildung betrachtet.

### 2.2.1 Grundbegriffe

Bei allen Begriffen der thermochemischen Umwandlung von Brennstoffen ist zu beachten, auf welchen Brennstoffzustand sie sich beziehen (Abbildung 2.4). Um Brennstoffe auch bei unterschiedlichen Wasser- und Aschegehalten zu vergleichen, wird beispielsweise der Heizwert häufig auf den wasser- und aschefreien Zustand bezogen.

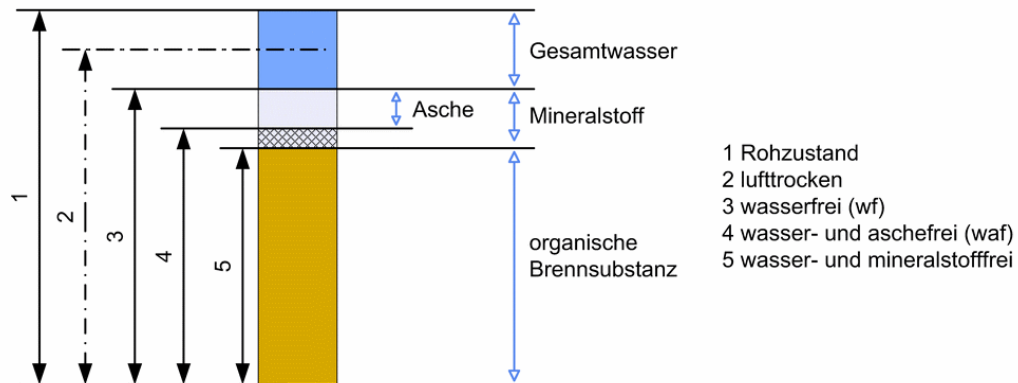


Abbildung 2.4: Bezugzzustände fester Brennstoffe nach [Kneer, 2006]

**Wasseranteil im Abgas und Taupunkt:** Der Wasseranteil im Abgas setzt sich aus dem Wasseranteil des Brennstoffes und des durch die Oxidation von Wasserstoff aus dem Brennstoff entstehenden Wassers zusammen. Bei verbrennungstechnischen Berechnungen wird in der Regel von „mittelfeuchter“ Luft - das entspricht einer relativen Feuchte der Luft von 80 % bei 20 °C - ausgegangen [ZIV, 1995]. Als Taupunkt wird die Temperatur bezeichnet, bei der das gasförmige Wasser im Abgas auskondensiert. Der Taupunkt hängt dabei vom Luftüberschuss, dem Brennstoff und dessen Wassergehalt ab. Je nach Ausführung der Feuerungs- und Abgasanlage kann eine Unterschreitung des Taupunktes und damit eine Kondensation von Wasser auftreten. Dies ist vielfach nicht erwünscht, da es dadurch zu Korrosion kommen kann. Bei Brennwertanlagen wird die Unterschreitung des Taupunktes gezielt genutzt, um die Kondensationswärme des Wasserdampfes zu nutzen.

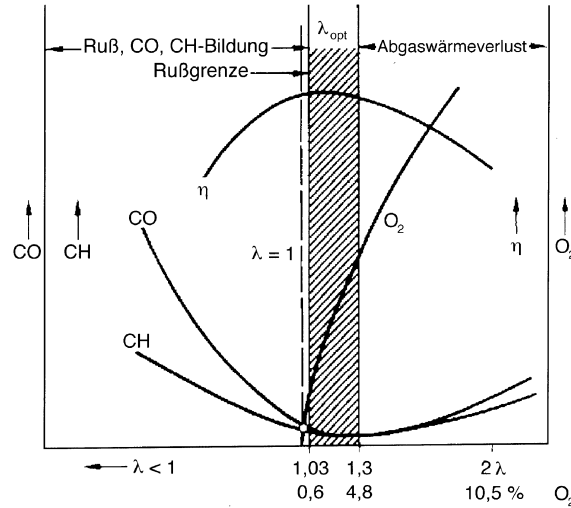
**Luftüberschusszahl  $\lambda$ :** Die Luftüberschusszahl beschreibt das Verhältnis aus der Luftmenge, die für die stöchiometrisch vollständige Oxidation des Brennstoffes notwendig ist ( $\dot{V}_{L,th}$  bzw.  $\dot{m}_{L,th}$ ) und der tatsächlichen Luftmenge, die zugeführt wird ( $\dot{V}_{L,pr}$  bzw.  $\dot{m}_{L,pr}$ ) [ZIV, 1995] [Nussbaumer, 2001].

$$\lambda = \frac{\dot{V}_{L,th}}{\dot{V}_{L,pr}} = \frac{\dot{m}_{L,th}}{\dot{m}_{L,pr}} \quad (2.11)$$

Feuerungsanlagen werden in der Regel mit Luftüberschuss betrieben, um Emissionen durch unverbrannten Brennstoff im Abgas gering zu halten und den Brennstoff bestmöglich zu nutzen [Hartmann u. a., 2003c]. Aus feuerungstechnischer Sicht hat der Luftüberschuss folgende Einflüsse [ZIV, 1995] [Nussbaumer, 2001]:

- hoher Luftüberschuss ( $1,5 < \lambda < 2$ ) bewirkt
  - niedrige Feuerraum- und Abgastemperatur (Kühlung durch Luftüberschuss)
  - große Abgasmenge
  - geringer  $\text{CO}_2$ -Gehalt
  - geringerer Anteil an unvollständig verbrannten Anteilen (z.B. Ruß oder CO)
- geringer Luftüberschuss ( $\lambda < 1,5$ ) bewirkt
  - hohe Feuerraum- und Abgastemperatur
  - geringe Abgasmenge
  - hoher  $\text{CO}_2$ -Gehalt
  - höherer Anteil an unvollständig verbrannten Anteilen (z.B. Ruß oder CO)

Bei  $\lambda > 2$  kann nach Nussbaumer [2001] die Schadstoffbildung begünstigt werden, da durch den hohen Luftüberschuss eine starke Kühlung auftritt und die für eine vollständige Oxidation notwendigen Temperaturen nicht mehr erreicht werden. Der Wärmeinhalt der Abgase und damit der Abgasverlust wird ebenfalls maßgeblich durch den Luftüberschuss bestimmt [ZIV, 1995]. Ziel der Regelung einer Feuerungsanlage ist ein Betriebspunkt mit hohem Wirkungsgrad bei gleichzeitig geringen Emissionen bzw. geringer Rußbildung (Abbildung 2.5)[Weber, 1998]. Im Gegensatz zu den bei Heizungsanlagen für Heizöl EL/Erdgas üblichen Luftüberschüssen von 1,03 bis 1,3 werden Biomassefeuerungen aufgrund der schwankenden Brennstoffqualität häufig mit Luftüberschüssen im Bereich von 1,4 bis 1,8 betrieben [Nussbaumer, 2001].



**Abbildung 2.5:** Einfluss der Luftzahl  $\lambda$  bzw. des Restsaustoffes auf die Emissionen und den Wirkungsgrad einer Feuerungsanlage mit Heizöl EL/Erdgas [Weber, 1998]

In der Praxis lässt sich der Luftüberschuss durch die Messung des  $\text{CO}_2$ - bzw.  $\text{O}_2$ -Gehaltes im Abgas bestimmen (siehe Anhang D).

**Wirkungsgrad  $\eta$ :** Der Wirkungsgrad von Feuerungsanlagen lässt sich direkt und indirekt bestimmen. Bei der direkten Ermittlung wird die abgegebene Wärmemenge  $\dot{Q}_N$  ins Verhältnis zum Brennstoffmassenstrom  $\dot{m}$  und dessen Heizwert  $H_{u,(m)}$  gesetzt (Gleichung 2.12). Bei Verbrennung von Gasen wird mit dem Volumenstrom  $\dot{V}$  und dem volumenbezogenen Heizwert  $H_{u,(v)}$  gearbeitet (Gleichung 2.13) [Nussbaumer und Kaltschmitt, 2001]. Der direkt bestimmte Wirkungsgrad wird auch als Kesselwirkungsgrad  $\eta_K$  bezeichnet.

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{m} \cdot H_{u,(m)}} \quad (\text{feste, flüssige Brennstoffe}) \quad (2.12)$$

$$\eta_K = \frac{\dot{Q}_N}{\dot{V} \cdot H_{u,(v)}} \quad (\text{gasf. Brennstoffe}) \quad (2.13)$$

Der direkt bestimmte Wirkungsgrad berücksichtigt sowohl Strahlungsverluste als auch Verluste durch unverbrannte Bestandteile in der Asche oder im Abgas. Allerdings ist die Bestimmung der abgegebenen Wärmemenge in der Praxis häufig schwierig. Deshalb wird zur Bewertung der Feuerungsanlage in der Regel der feuerungstechnische Wirkungsgrad  $\eta_F$  verwendet. Er wird indirekt bestimmt, indem man den Wärmeverlust der heißen Abgase (Abgasverlust)  $q_A$  bestimmt.

Damit sind allerdings weder Strahlungsverluste noch Verluste durch unverbrannten Brennstoff in der Asche berücksichtigt [Nussbaumer und Kaltschmitt, 2001]. Für die Bestimmung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades  $\eta_F$  gilt Gleichung 2.14 [Nussbaumer, 2001].

$$\eta_F = 100 - q_A - q_{\text{Unv}} \quad (2.14)$$

mit

$$q_A = \text{Abgasverlust in \%} \quad (2.15)$$

$$q_{\text{Unv}} = \text{Unverbrannte Bestandteile im Abgas (z.B. CO)} \quad (2.16)$$

**Abgasverlust  $q_A$ :** Nach BMU [2006] ist der Abgasverlust  $q_A$  definiert als

„die Differenz zwischen dem Wärmeinhalt des Abgases und der Verbrennungsluft, bezogen auf den Heizwert des Brennstoffes.“

Diese Definition legt eindeutig fest, dass der Abgasverlust auf den Heizwert eines Brennstoffes und nicht auf den Brennwert bezogen wird. Der Energieinhalt des Wasserdampfes im Abgas bleibt somit unberücksichtigt. Diese Berechnungsweise führt in der Praxis zu Angaben von feuerungstechnischen Wirkungsgraden  $> 100\%$  bei Anlagen mit Brennwertnutzung. Bei Erdgas H, einer Brennwertanlage (d.h. vollständiger Kondensation des Wasserdampfes im Abgas im Wärmetauscher der Anlage) und einem geschätzten Abgasverlust von  $5\%$  ergäbe sich so ein  $\eta_F$  von  $106\%$  (Gleichung 2.17 bis 2.20).

$$H_{u,\text{Erdgas H}} = 36,12 \text{ MJ/m}^3 \hat{=} 100\% \quad (2.17)$$

$$H_{o,\text{Erdgas H}} = 40,00 \text{ MJ/m}^3 \hat{=} 111\% \text{ von } H_{u,\text{Erdgas H}} \quad (2.18)$$

$$\text{mit } q_A = 5\% \quad (2.19)$$

$$\implies \eta_F = 111\% - 5\% = 106\% \quad (2.20)$$

Die Berechnung des Abgasverlustes  $q_A$  erfolgt nach SIEGERT mittels brennstoffspezifischer Koeffizienten. Dabei gilt Gleichung 2.21 bei Messung des Sauerstoffgehaltes im Abgas und Gleichung 2.22 bei Messung des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes im Abgas (siehe Abschnitt D).

$$q_A = (T_A - T_L) \cdot \left( \frac{A_2}{21 - O_2} + B \right) \quad (2.21)$$

$$q_A = (T_A - T_L) \cdot \left( \frac{A_1}{CO_2} + B \right) \quad (2.22)$$

mit

$T_A$  : Abgastemperatur in °C

$T_L$  : Verbrennungslufttemperatur in °C

$A_1, A_2, B$  : brennstoffspezifische Koeffizienten

Die brennstoffspezifischen Koeffizienten lassen sich mittels Verbrennungsrechnung aus der Elementaranalyse eines Brennstoffes ermitteln (siehe Anhang D Verbrennungsrechnung).

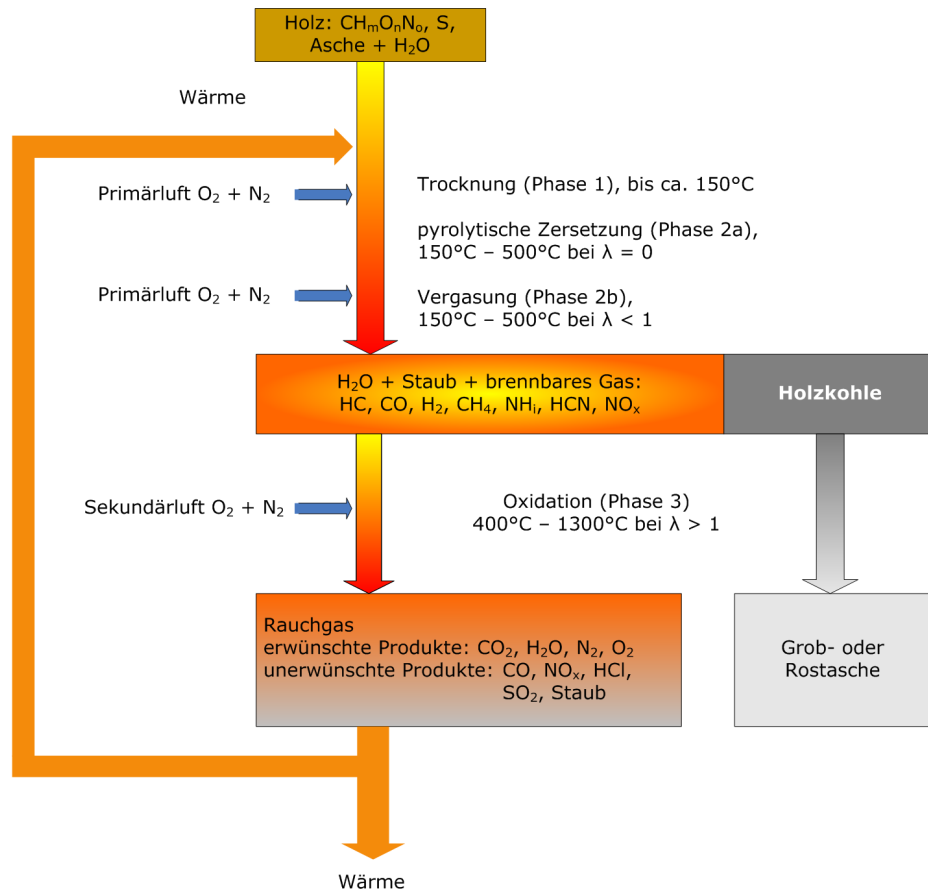
### 2.2.2 Grundlagen der Verbrennung

Der Verbrennungsprozess für Holz lässt sich nach Obernberger [1997] in die drei Phasen

1. Trocknung
2.   a) Pyrolyse  
      b) Vergasung
3. Oxidation

einteilen (Abbildung 2.6). Im Idealfall laufen alle drei Phasen in räumlich getrennten Bereichen der Feuerungsanlage ab, um jeweils optimale Bedingungen für jeden Teilschritt erzeugen zu können.

**Trocknung** (Phase 1, bis ca. 150 °C): Der Trocknungsprozess verläuft endotherm. Die benötigte Wärme wird über die Feuerraumkonstruktion vom Verbrennungsbereich übertragen. Sehr feuchte Brennstoffe wirken sich negativ auf die Verbrennung aus, da sehr viel Wärme für die Verdampfung des enthaltenen Wasser aufgewendet werden muss. Zusätzlich steigen die Emissionen, da sich im Brennstoff lokale Niedertemperaturzonen ausbilden können, in denen eine unvollständige Verbrennung der Brennstoffkomponenten erfolgt [Nussbaumer, 2001].

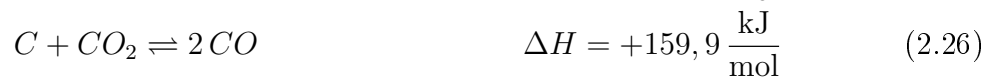


**Abbildung 2.6:** Schematische Darstellung des Verbrennungsprozesses nach Obernberger [1997] bei einer Rostfeuerung

**Pyrolyse** (Phase 2a, ab  $150^\circ\text{C}$  bis  $500^\circ\text{C}$  bei  $\lambda = 0$ ): Da der Brennstoff nicht unendlich fein verteilt in der Feuerungsanlage vorliegen kann, entstehen bei der Erhitzung Zonen, die keinen Kontakt mit dem Sauerstoff der Verbrennungsluft haben. Dort finden ab  $150^\circ\text{C}$  pyrolytische Zersetzungsreaktionen statt, bei denen die Strukturen des Brennstoffes zerstört werden. Als Reaktionsprodukte bilden sich flüchtige Gase ( $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ) und Dämpfe organischer Stoffe. Prinzipiell kann der Pyrolyseprozess in der Feuerungsanlage durch Aufbereitung des Brennstoffes (Zerkleinern) und gezielte Verbrennungsluftführung beeinflusst werden. Wesentlich für das Pyrolyseverhalten des Brennstoffes ist zudem die Aufheizgeschwindigkeit und Aufheizrate [Nussbaumer und Kaltschmitt, 2001] [Obernberger, 1997]. Bei höheren Temperaturen und langen Verweilzeiten werden flüssige Pyrolyseprodukte in gasförmige umgewandelt. Als Rückstand der Pyrolyse bleibt Restkohlenstoff zurück, dieser wird bei der Vergasung in brennbare Gase und Asche aufgespalten.



**Vergasung** (Phase 2b, bei  $150 - 500^\circ\text{C}$  und  $\lambda < 1$ ): Bei Temperaturen ab  $150^\circ\text{C}$  beginnt die Freisetzung flüchtiger Verbindungen, bei Temperaturen von  $300^\circ\text{C}$  setzt der Prozess voll ein [Oberberger, 1997]. Dabei laufen nach [Nussbaumer und Kaltschmitt, 2001] die Teilreaktionen 2.23 bis 2.27 ab.



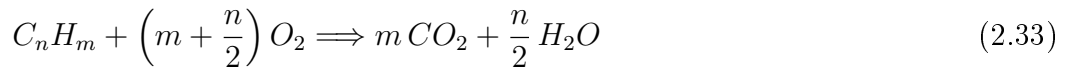
Diese Reaktion laufen sowohl exotherm (2.23, 2.24 und 2.27) als auch endotherm (2.25 und 2.26) ab. Neben der Umwandlung des Kohlenstoffs werden auch die brennbaren Gase aus der Pyrolyse weiteren Umwandlungsschritten unterzogen. Wesentlich dabei sind die Shiftreaktion (2.28) und die Methanisierung (2.29) [Nussbaumer und Kaltschmitt, 2001].



Der Vergasungsprozess liefert damit einen geringen Teil Wärme und gleichzeitig ein brennbares Gas. Wird Holz verbrannt sind die Hauptbestandteile dieses Holzgases Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserdampf und Methan. Gleichzeitig sind auch große Mengen Stickstoff enthalten, wenn Luft für den Verbrennungsprozess genutzt wird. Darüber hinaus können noch Nebenbestandteile wie Teere (aus dem Pyrolyseprozess), Spurengase und Asche bzw. Staub enthalten sein. Einfluss auf die Vergasungsreaktion haben die Brennstoffeigenschaften (Feuchte, Elementargehalte), das Vergasungsmittel (i.d.R. Luft) sowie die Prozessbedingungen (Aufheizzeit, Druck, Temperatur, Luftzufuhr) [Nussbaumer, 2001].

**Oxidation** (Phase 3, bei  $400 - 1300^\circ\text{C}$  und  $\lambda > 1$ ): Bei der Oxidation werden die brennbaren Gase aus der Pyrolyse und Vergasung vollständig oxidiert. Kohlenmonoxid, Wasserstoff, Methan und eventuell vorhandene höhere Kohlenwasserstoffe werden zu Kohlendioxid und Wasser umgewandelt (Gleichung 2.30 bis 2.33)

[Nussbaumer und Kaltschmitt, 2001]. Damit eine vollständige Oxidation ablaufen kann, muss genügend Sauerstoff vorhanden sein. Dies wird mit entsprechendem Luftüberschuss erreicht. Gleichzeitig muss sichergestellt sein, dass Brenngas und Sauerstoff gut durchmischt sind. Die Durchmischung von Brennstoff und Sauerstoff (Verbrennungsluft) kann durch technische Maßnahmen wie Zerkleinern des Brennstoffes oder gezieltes Einblasen von zusätzlicher Verbrennungsluft (Sekundär- oder Tertiärluft) erfolgen.



Generell ist zu beachten, dass die Teilreaktionen Pyrolyse, Vergasung und Oxidation durch lokale Abkühlung, Austrag der Brennstoffpartikel aus den heißen Reaktionszonen oder fehlendem Sauerstoff unvollständig ablaufen können [Oberberger, 1997] [Nussbaumer und Kaltschmitt, 2001]. Die dann unvollständig oxidierten Reaktionsprodukte<sup>1</sup> werden mit dem Abgas ausgetragen. Um eine möglichst vollständige Oxidation zu erreichen ist deshalb ein spezielles Feuerraumdesign und eine gezielte Verbrennungsluftzufuhr notwendig.

### 2.2.3 Schadstoffbildung

Bei der vollständigen Oxidation eines Brennstoffes mit den Hauptbestandteilen C, H, O entstehen Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) als Emissionen. CO<sub>2</sub> wird dabei bei der Biomassenutzung<sup>2</sup> nicht als zusätzlich klimawirksam angesehen, da nur die Menge emittiert wird, die vorher beim Wachstum aufgenommen wurde [Nussbaumer, 2001]. Allerdings werden durch die Bereitstellung (Anbau, Ernte, Transport usw.) des Brennstoffes selbst CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist abhängig vom Kohlenstoffgehalt im Brennstoff und kann nur durch eine Erhöhung der Anlageneffizienz und damit verbundener Brennstoffeinsparung vermindert werden. Der emittierte

---

<sup>1</sup>z.B. CO oder Kohlenwasserstoffe

<sup>2</sup>bei nachhaltigem Anbau der Biomasse

Wasserdampf wird als Teil des natürlichen Wasserkreislaufes angesehen und gilt daher als unbedenklich [Nussbaumer, 2001].

Neben den Produkten der vollständigen Verbrennung können aber auch Emissionen durch unvollständige Verbrennung entstehen. Diese lassen sich nach Pesch [2006] in folgende Gruppen einteilen:

- **brennstoffspezifische Schadstoffe z.B.:**

- Schwefeloxide ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ )
- Chlorwasserstoff ( $\text{HCl}$ )
- Asche/Staub

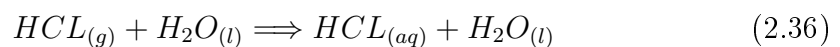
- **prozessspezifische Schadstoffe z.B.:**

- Stickoxide ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ )
- Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ )
- dampf- und gasförmige organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff -  $\text{TOC}^1$ )
- Ruß/Staub

**Schwefeloxide:** Der Gehalt an Schwefeloxiden ist vom Schwefelgehalt im Brennstoff abhängig. Für Holzpellets ist der Schwefelgehalt durch die DINplus [2002] auf 0,04 % begrenzt (siehe Anhang B, Tabelle B.2), dadurch sind die Schwefeldioxidemissionen nur von untergeordneter Bedeutung bei Holzpellets. Sowohl Schwefeldioxid als auch Schwefeltrioxid sind giftig und wasserlöslich. In Verbindung mit Wasser bildet sich schweflige Säure  $\text{H}_2\text{SO}_3$  (2.34) bzw. Schwefelsäure  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2.35), die in der Feuerungs- und Abgasanlage zu Korrosion führen können.



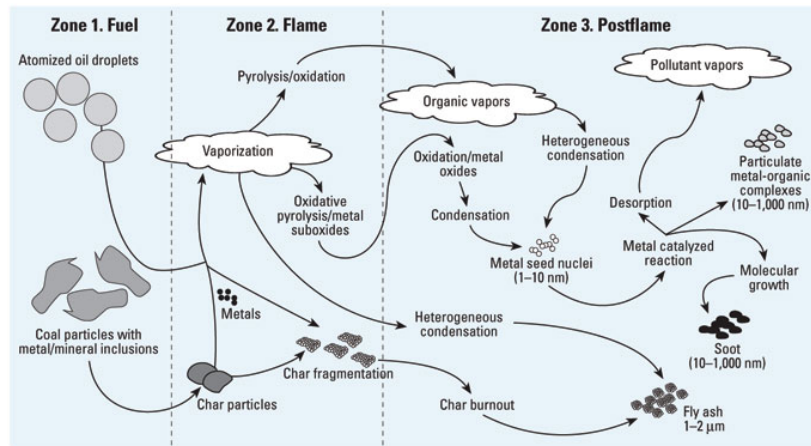
**Chlorwasserstoff:** Der Gehalt von  $\text{HCl}$  ist vom Chlorgehalt im Brennstoff abhängig. Chlor lässt sich in Wasser lösen, es entsteht Salzsäure (2.36).



---

<sup>1</sup>engl.: Total Organic Carbon

**Staub:** Der bei der Verbrennung entstehende Staub setzt sich aus den Feinanteilen der Asche ( $5 - 10 \mu m$ ) und des Rußes (Kondensationsaerosole  $\approx 2 \mu m$ ) zusammen [Pesch, 2006]. Dabei können sowohl Brennstoff als auch der Verbrennungsprozess selbst sowie nachfolgende Kondensationsprozesse das Partikelwachstum begünstigen (Abbildung 2.7) [Cormier u. a., 2006].



**Abbildung 2.7:** Staubbildung in Verbrennungssystemen: Partikelwachstum und deren Transport [Cormier u. a., 2006]

Die entstehenden Partikel lassen sich anhand ihrer Größe klassifizieren. So spricht man von Feinstaub wenn Partikel  $< 10 \mu m$  vorliegen. Die Prozesse zur Entstehung von Feinstäuben und deren Wirkung auf den Menschen sind Gegenstand umfangreicher Untersuchungen (z.B. [Hainisch, 2003]). Im Rahmen dieser Arbeit war bezüglich des Staubgehaltes nur dessen Menge und nicht die Partikelverteilung von Relevanz.

**Stickoxide:** Da Stickstoff zu rund 79 % in der Luft enthalten ist, nimmt er zwangsläufig an jedem Verbrennungsprozess teil, bei dem Luft als Oxidationsmittel eingesetzt wird. Darüber hinaus enthalten viele Festbrennstoffe Stickstoff. Bei der Bildung von Stickoxide werden drei Bildungsmechanismen unterschieden [Nussbaumer, 2001]:

- thermisches NO aus dem Luftstickstoff und Luftsauerstoff,
- promptes NO aus Kohlenwasserstoff-Radikalen und Luftsauerstoff und
- Brennstoff-NO aus im Brennstoff gebundenen Stickstoff.

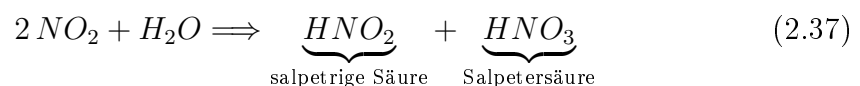
Die Bildung von thermischem, promptem und Brennstoff-NO wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die Haupteinflussgrößen lassen sich nach Pesch [2006],

Nussbaumer [2001] und Strauß [2006] wie folgt definieren:

- thermisches NO:
  - Flammentemperatur oberhalb ca. 1400 °C,
  - Verweilzeit und
  - Luftüberschuss.
- promptes NO:
  - Brennstoffradikale
- Brennstoff-NO:
  - Brennstoffzusammensetzung (N-Gehalt)

Der Bildungsmechanismus von thermischem NO ist erst bei Temperaturen über 1400 °C von Bedeutung. Bei promptem NO werden Temperaturen > 1600 °C benötigt [Nussbaumer, 2001]. Da Biomassefeuerungen in der Regel mit Temperaturen unterhalb von 1200 °C betrieben werden, ist bei diesen der Stickstoffgehalt im Brennstoff Haupteinflussgröße auf den Stickoxidgehalt im Abgas [Nussbaumer, 2001].

Sowohl NO und NO<sub>2</sub> sind giftig, NO zusätzlich noch ätzend. In Verbindung mit Sauerstoff verbindet sich NO zu NO<sub>2</sub>, welches sich mit Wasser zu salpetriger Säure und Salpetersäure verbindet (2.37). Damit stellen Stickoxidemissionen aus Verbrennungsanlagen einen wesentlichen Bestandteil des „sauren Regens“ dar.



Zusätzlich wirken Stickoxide als Vorläuferstoff für die Ozonbildung in bodennahen Schichten der Troposphäre.

**Kohlenmonoxid:** CO ist das wesentliche Produkt der unvollständigen Oxidation des Brennstoffkohlenstoffes. Damit ist es als Kenngröße für die Vollständigkeit der Verbrennung interessant. Durch seine Wirkung als Blutgift ist es schon in sehr geringen Mengen tödlich.

**Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC):** Als Gesamtkohlenstoffgehalt werden dampf- und gasförmige organische Stoffe im Abgas bezeichnet. Sie weisen einen ring- oder kettenförmigen Aufbau aus Kohlenstoff auf. In der Ring- oder Kettenstruktur können Schwefel, Stickstoff, Sauerstoff oder auch Wasserstoffmoleküle eingebunden sein. Grundsätzlich können eine Vielzahl von organischen Verbindungen bei der thermischen Nutzung von Biomasse im Abgas enthalten sein, so z.B. aromatische Kohlenwasserstoffe, Aldehyde, Ketone, Karbonsäuren und Alkohole aber auch höher-molekulare Stoffe wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) [Launhardt, 2002]. Ebenso vielfältig wie die Stoffe selbst können deren Wirkungen auf den Menschen und die Umwelt sein. Sie reichen von nichttoxischen bis zu hochtoxischen bzw. krebserregenden Stoffen (z.B. Benzol).

Ursache für organische Stoffe im Abgas ist eine unvollkommene Verbrennung, weshalb der Gesamtkohlenstoffgehalt in Verbindung mit dem CO-Gehalt als Kenngröße zur Bewertung der Vollständigkeit einer Verbrennung herangezogen werden kann [Launhardt, 2002]. Die messtechnische Erfassung des Gesamtkohlenstoffgehaltes kann mittels Flammenionisation erfolgen. Bei diesem Messverfahren ist eine Einzelbestimmung der organischen Stoffe im Abgas nicht möglich, es wird lediglich deren Summe erfasst. Eine Beeinflussung des gemessenen Gesamtkohlenstoffgehaltes durch CO im Abgas wird durch den konstruktiven Aufbau des Messgerätes verhindert.

Um den Schadstoffausstoß zu verringern bieten sich Maßnahmen zur Beeinflussung des Verbrennungsprozesses (Primärmaßnahmen) und Maßnahmen zur Reinigung des Rauchgases (Sekundärmaßnahmen) an. Bei Kleinf Feuerungsanlagen kommen in der Regel nur Primärmaßnahmen zum Einsatz, das bedeutet speziell auf den Brennstoff abgestimmte Feuerungstechnik um den Verbrennungsprozess mit geringen Emissionen betreiben zu können. Sekundärmaßnahmen wie Staubfilter, Entschwefelungsanlagen oder Entstickungsanlagen sind aufgrund ihres hohen technischen Aufwandes nur bei Anlagen im größeren Leistungsbereich wirtschaftlich sinnvoll.

## 2.2.4 Anforderungen an die Feuerraumkonstruktion

Aufgrund der spezifischen Eigenschaften von Biomasse ergeben sich besondere Anforderungen an die Feuerungskonstruktion. Insbesondere der hohe Anteil an flüchtigen Bestandteilen (Holz > 80 %) macht eine Zufuhr von Sekundärluft nötig, um das entstehende Gas vollständig zu oxidieren. Die Feuerungsanlage muss so aufgebaut sein,

dass folgende Vorraussetzungen erfüllt sind, um einen möglichst vollständigen Brennstoffumsatz zu ermöglichen [Hartmann u. a., 2003b]:

- Zufuhr von Oxidationsmittel (Luft) im Überschuss,
- ausreichend lange Verweilzeiten des Brenngas-/Luftgemisches in der heißen Reaktionszone,
- ausreichend hohe Verbrennungstemperatur und
- gute Vermischung von Brennstoff und Verbrennungsluft.

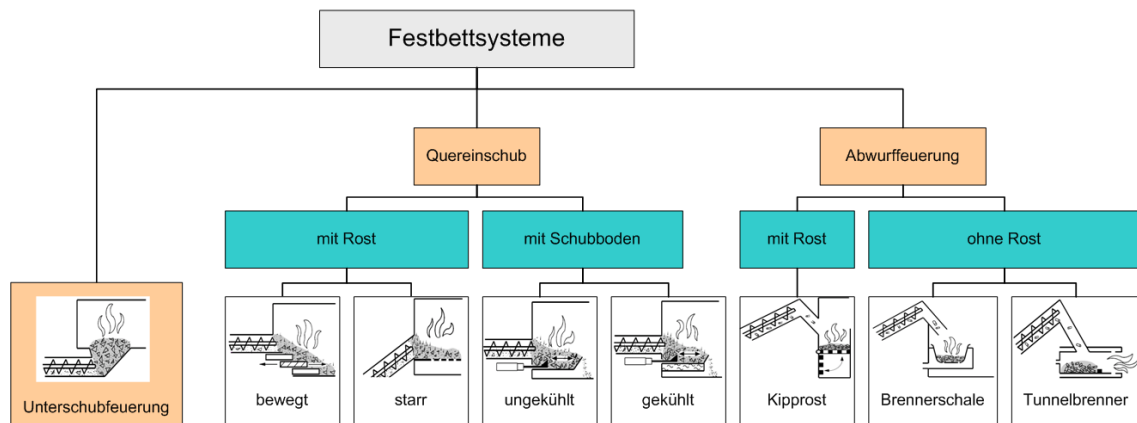
Einige dieser Vorraussetzungen wirken sowohl positiv als auch negativ auf das Emissionsverhalten, insbesondere bei der Stickoxidbildung. So bewirkt ein hoher Luftüberschuss eine Senkung der CO-Emissionen, gleichzeitig kann durch die erhöhte Temperatur und den erhöhten Stickstoff- und Sauerstoffgehalt aber die thermische NO<sub>x</sub>-Bildung begünstigt werden. Bei der Verweilzeit verhält es sich ähnlich, eine hohe Verweilzeit kann den Anteil an unverbrannten Bestandteilen senken, wirkt aber gleichzeitig günstig auf die Bildung von thermischem NO<sub>x</sub>. Generell ist ein Betrieb mit so wenig Luftüberschuss wie möglich verbunden mit einem möglichst geringen Teil an unverbrannten Bestandteilen anzustreben, selbst wenn durch diese Betriebsführung die NO<sub>x</sub>-Emissionen, unter Beachtung der gesetzlichen Grenzwerte, erhöht werden. Mit dieser Betriebsweise wird der Abgasverlust gering gehalten, wodurch sich der feuerungstechnische Wirkungsgrad erhöht. So kann die Betriebszeit der Feuerungsanlage gesenkt werden, der Brennstoff wird dann bestmöglich umgesetzt. Insgesamt wird so die emittierte Menge an Schadstoffen verringert.

## 2.3 Feuerungsanlagentechnik

Die wesentlichen Anforderungen an eine Feuerungsanlage - Wärmebereitstellung, hohe Effizienz und geringe Umweltbelastung - erfordern spezielle Lösungen für die Bereiche Brennstofftransport, Verbrennungsführung sowie Regelung. Nachfolgend werden, die bei automatisch beschickten Festbrennstoff-Kleinfeuerungsanlagen wichtigen, Feuerungs- und Anlagenbesonderheiten erläutert.

### 2.3.1 Feuerungsprinzipien

Für den Kleinf Feuerungsbereich bis 100 kW sind in der Regel Festbette Systeme zur Verbrennung von Festbrennstoffen im Einsatz [Nussbaumer und Kaltschmitt, 2001]. Bei diesen Systemen wird der Brennstoff i.d.R. über eine Förderschnecke in die Feuerungsanlage transportiert. Die Festbette Systeme lassen sich anhand der Brennstoffverteilung in der Kesselanlage weiter in Unterschub-, Quereinschub- und Abwurf feuerung unterteilen (Abbildung 2.8). Bei den Quereinschub- und Abwurf systemen kann eine weitere Unterscheidung nach Ausführung des Rostes vorgenommen werden.



**Abbildung 2.8:** Feuerungssysteme für Festbrennstoffe bei Kleinf Feuerungsanlagen nach Hartmann u. a. [2003c]

Die verschiedenen Feuerungssysteme sind für unterschiedliche Leistungsklassen ausgelegt (siehe Tabelle 2.10).



**Tabelle 2.10:** *Feuerungssysteme für Holzpellets und deren Leistungsbereiche nach Hartmann u. a. [2003c] und Nussbaumer und Kaltschmitt [2001]*

Feuerungssystem	Leistungsbereich
	in kW
Unterschub	10 bis 2.500
starrer Rost	ab 35
bewegter Rost	15 bis >20.000
Schubboden	15 bis 800
Kipprost	15 bis 30
Brennerschale	6 bis 30
Tunnelbrenner	ab 10

### 2.3.2 Systemeinbindung

Die Nutzung von biogenen Brennstoffen stellt erhöhte Anforderungen an die Feuerungsanlage. Wie in den vorhergehenden Abschnitten gezeigt, erfordern die wechselnde Zusammensetzung, der im Vergleich zu fossilen Brennstoffen geringere Energiegehalt sowie der hohe Anteil flüchtiger Bestandteile und der teilweise hohe Asche- und Nährstoffgehalt<sup>1</sup> besondere Berücksichtigung bei der Auslegung des Wärmerzeugungssystems und der Einbindung in bestehende Systeme.

**Brennstofflagerung/Brennstoffentnahme:** Die Standardisierung von Holzpellets ermöglicht einen einfachen Transport. Die Pellets können als Sackware oder lose mittels Druckluft in den Brennstoffspeicher des Verbrauchers verbracht werden. Die automatische Zuführung zur Feuerungsanlage kann dann mittels Pneumatik über ein Rohrsystem oder über eine Förderschnecke erfolgen. Dadurch ist ein automatisierter Betrieb möglich. Ein hoher Abrieb der Pellets kann bei beiden Systemen zu Problemen führen. Pellets mit einem möglichst geringen Abriebanteil sind deshalb von Vorteil. Anlagen mit kleiner Leistung sind häufig mit einem Vorratsbehälter am Kessel versehen, der von Zeit zu Zeit automatisch aufgefüllt wird, um die Laufzeit des Fördersystems gering zu halten. Alternativ zum Vorratsbehälter ist auch ein Doppelschneckensystem möglich. Anforderungen an den Lagerraum hinsichtlich Brandschutz (Feuerwiderstandsklassen der Baustoffe, maximale Lagermengen) sind in den jeweiligen Feuerungsverordnungen der Bundesländer zu finden.

---

<sup>1</sup>z.B. Stickstoff, Kalium, Magnesium, Kalzium

**Verbrennungsluftversorgung:** Bei automatisch beschickten Feuerungsanlagen erfolgt die Versorgung mit Verbrennungsluft über steuerbare Gebläse. Je nach Anlagenart und Größe können mehrere Gebläse zum Einsatz kommen um die einzelnen, räumlich getrennten Phasen des Verbrennungsprozesses mit einer jeweils abgestimmten Menge an Luft zu versorgen (Primär-, Sekundär- oder Tertiärluft). Die Verbrennungsluftzufuhr kann weiterhin für die Regelung des Verbrennungsprozesses eingesetzt werden. Zu beachten ist, dass der Aufstellraum über entsprechende Zuluftöffnungen für die Luftzufuhr verfügt. Alternativ ist bei einigen Anlagen auch eine raumluftunabhängige Betriebsweise möglich. Dort wird die Verbrennungsluft dann über einen separaten Kanal von außen zugeführt.

**Wärmeübertrager:** In der Regel sind Pelletfeuerungen mit einer automatischen Rücklaufanhebung versehen. Dadurch wird ein Teil des Vorlaufs mit dem Rücklauf vermischt. So wird ein zu hohes Temperaturgefälle zwischen Vor- und Rücklauf und damit eventuelle Kondensatbildung an den Wärmetauscherwandungen verhindert. In Verbindung mit Kondensatbildung sind insbesondere die Schwefel- und Chlorgehalte des Brennstoffes von Interesse, da aus deren Reaktion mit Wasser Säuren entstehen können, die zu Korrosion des Wärmetauschers führen. Da Holzpellets i.d.R. nur geringe Chlor- und Schwefelgehalte aufweisen, ist die Säurebildung durch Kondensation meist unkritisch. Obwohl Holzpellets einen geringen Ascheanteil aufweisen (max 0,5 % [DINplus, 2002]), besteht die Notwendigkeit automatische Reinigungssysteme für den Wärmetauscher vorzusehen, damit der Wärmeübergang und Abzug der Abgase durch anhaftenden Staub und Asche nicht behindert wird.

**Regelung - Leistungsregelung:** Die Leistungsregelung erfolgt über Änderung der Brennstoff- und Verbrennungsluftzufuhr. Bei Holzpelletfeuerungen kommen in der Regel Förderschnecken für die Brennstoff- und Gebläse für die Verbrennungsluftzufuhr zum Einsatz. Die Drehzahl beider Systeme kann für den leistungsangepassten Betrieb gesteuert werden. Häufig wird nur die Brennstoffzufuhr variiert. Für die Wärmeanforderung kommen übliche Heizkreisregler zum Einsatz. Die Erfassung des Zustandes in der Feuerungsanlage erfolgt über Messung der Temperatur im Feuerraum. Mit diesen Daten passt die Regelung die jeweilige Wärmeleistung an den Bedarf an. Damit lassen sich Holzpelletfeuerungen in einem Leistungsbereich von 30 % bis 100 % regeln [Hartmann u. a., 2003c]. Insbesondere wenn so An- und Abfahrvorgänge vermieden werden können, erhöht sich aufgrund des stabileren Verbrennungsverhaltens der Nutzungsgrad und die Emissionen sinken.

**Regelung - Verbrennungsprozessregelung:** Die Steuerung des Verbrennungsprozesses erfolgt durch Einstellung des Brennstoff-/Luftgemisches. Dafür kann über einen Sensor der Sauerstoffgehalt im Abgas und damit der Luftüberschuss gemessen werden. Alternativ ist auch die Messung des Kohlenmonoxid- oder Kohlendioxidgehaltes als Maßstab für die Verbrennungsqualität möglich. Beeinflusst wird der Luftüberschuss von der Brennstoffmenge und der Verbrennungsluftmenge (Primär- und Sekundärluft). Für eine hohe Verbrennungsgüte wird je nach Zustand und Anlage die Primär- oder Sekundärluftzufuhr verändert um eine hohe Ausbrandqualität und damit einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Die Einstellung des Sollwertes für den Luftüberschuss sollte in der Praxis eher höher als nötig erfolgen, damit ausreichend Luft vorhanden ist und keine erhöhten Emissionen durch unvollkommene Verbrennung auftreten.

Wie schon in Kapitel 2.2.1 (Grundbegriffe) beim Luftüberschuss angedeutet, kann eine Feuerungsanlage hinsichtlich Wirkungsgrad (Abgasverlust) und niedrigen Emissionen geregelt werden (Abbildung 2.5, Seite 23). Bei Kleinanlagen findet oftmals nur eine Leistungsregelung statt. Vereinzelt verfügen die Anlagen auch über einen Sauerstoff- oder  $\text{CO}_2$ -Sensor, um so den Luftüberschuss zu bestimmen und dann den feuerungstechnischen Wirkungsgrad zu steuern. Um dabei die Emissionen gering zu halten, wird bei diesen Anlagen mit erhöhtem Luftüberschuss gearbeitet. Eine Messung von  $\lambda$  und den Emissionen (z.B. CO) und entsprechende Regelung wird in der Regel erst bei Anlagen  $> 350 \text{ kW}$  eingesetzt [Weber, 1998].

**Sicherheitseinrichtungen:** Zusätzlich zu den üblichen Sicherheitseinrichtungen von Heizungsanlagen (Druckausdehnungsgefäß, Überdruckventil, Sicherheitstemperaturbegrenzer) müssen Pelletanlagen mit einer Rückbrandsicherung versehen werden, um im Schadensfall ein Vordringen der Flammen aus dem Brennraum in die Brennstoffzuführung und ins Brennstofflager zu verhindern. Praktisch wird dies durch Einbau von Brandschutzklappen, Zellenradschleusen oder automatischer Löscheinrichtungen verhindert [Hartmann u. a., 2003c]. Diese Systeme sind in der Regel so ausgeführt, dass für deren Betrieb keine Hilfsenergie notwendig ist.

## 3 Methodik und Materialien

In diesem Kapitel werden die verwendeten Brennstoffe, die Feuerungsanlagen und deren Besonderheiten sowie für die Messung eingestellte Parameter erläutert. Weiterhin wird auf den Aufbau des Versuchsstandes, die verwendete Messtechnik und das Versuchsprogramm eingegangen

### 3.1 Brennstoffe

Um den Einfluss des PHM auf das Ascheschmelzverhalten im Vorfeld bewerten zu können, wurden die Versuchsbrennstoffe und die PHM hinsichtlich ihrer Elementar- und Alkaliengehalte analysiert. Von den Holzpellets wurde außerdem noch der Abrieb und das Ascheschmelzverhalten bestimmt. Alle Analysen wurden vom Lehr- und Forschungsgebiet für Kokereiwesen, Brikettierung und Thermische Abfallbehandlung der RWTH Aachen als Projektpartner durchgeführt. Die Elementar- und Alkaliengehalte sind im Anhang F.1 und F.2 zu finden, die Abrieb- und Ascheerweichungswerte sind in nachfolgender Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Aufgrund des begrenzten Zeitumfangs der Diplomarbeit konnten nicht alle Pelletchargen in die Verbrennungsversuche einbezogen werden. In Absprache mit den Projektpartnern sowie unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Holzpellets mit thermisch modifizierter Quellstärke der Definition von Presshilfsmitteln in der DINplus nur im Toleranzfall entsprechen, wurden die Chargen Holzpellets:

- ohne Presshilfsmittel,
- mit 2,0 % Maisstärke,
- mit 1,5 % Roggenmehl und
- mit 1,5 % Kartoffelstärke sowie
- mit 1,5 % Weizenstärke

für die weiteren Versuche ausgewählt. Laut Aussage des Pelletierers reagieren Mais- und Weizenstärke ähnlich. Sie stellen zur Zeit die gebräuchlichsten PHM auf dem Markt dar [Schlaug (Mann Naturenergie) u. a., 2006].

**Tabelle 3.1:** *Abrieb und Ascheschmelzverhalten der Versuchspellets*

Holzpellets	Abrieb	Ascheschmelzverhalten			
		$\vartheta_{EP}$	$\vartheta_{SP}$	$\vartheta_{HK}$	$\vartheta_{FT}$
	in %	in °C	in °C	in °C	in °C
ohne PHM	6,1	1340	1400	1430	1480
mit 2,0 % Maisstärke	1,5	1330	1500	1530	1590
mit 1,5 % Weizenstärke	0,9	1460	1520	1560	1600
mit 1,5 % Kartoffelstärke	0,9	1340	1490	1530	1570
mit 1,5 % Roggenmehl	1,3	1380	1430	1550	1570

*EP: Erweichungstemperatur, SP: Sphärischtemperatur,*

*HK: Halbkugeltemperatur, FT: Fließtemperatur*

Für die Verbrennungsversuche wurden zunächst die Holzpellets

- ohne Presshilfsmittel (PHM),
- mit 2,0 % Maisstärke,
- mit 1,5 % Roggenmehl und
- mit 1,5 % Kartoffelstärke

eingesetzt (siehe Abschnitt 3.6). Üblicherweise werden die Holzpellets nicht direkt vom Hersteller an den Kunden geliefert. Der Transport findet in der Regel über Zwischenhändler statt, so dass die Holzpellets mehr oder weniger oft umgeschlagen werden. Durch diese Verladevorgänge, inklusive der Lieferung und dem Einblasen in den Lageraum beim Verbraucher, erhöht sich der Feinanteil durch die mechanische Belastung der Holzpellets. Darüber hinaus werden die Pellets durch das Brennstofftransportsystem (zw. Brennstofflager und Kessel) beim Verbraucher beansprucht. Um diese Vorgänge nachzubilden, wurden die Holzpellets

- ohne PHM,
- mit 1,5 % Weizenstärke,
- mit 1,5 % Roggenmehl und

- mit 1,5 % Kartoffelstärke

zerkleinert. Die Zerkleinerung erfolgte mit einem handelsüblichen Häcksler (vergleichbar mit einem Gartenschredder). So konnte im weiteren Versuchsverlauf ein erhöhter Feinanteil des Brennstoffes und dessen Einfluss auf das Emissionsverhalten, den Anlagenbetrieb und das Ascheerweichungsverhalten untersucht werden.

## 3.2 Verwendete Feuerungsanlagen

### 3.2.1 Auswahlkriterien

Für die Verbrennungsversuche kommen zwei handelsübliche Kessel für Holzpellets im Leistungsbereich zwischen 15 – 20 kW Nennwärmeleistung zum Einsatz (für technische Daten siehe Anhang E):

- Paradigma Pelletti II SR 203 und
- Vitolig 300 VL3A.

Der Aufbau und die Funktionsweise der Anlagen wird in den folgenden Kapiteln näher beschrieben. Folgende Punkte fanden bei der Auswahl beider Anlagen Berücksichtigung:

- Feuerungsart (Unterschub und Abwurfffeuerung mit Brennerschale),
- Kenntnis über Probleme bei Anlagen mit Abwurfffeuerung vom Projektpartner,
- hohe Verbreitung dieser Typen in Deutschland,
- Serienprodukt.

Für die Verbrennungsversuche wurden beide Feuerungsanlagen mit den jeweiligen Werkseinstellungen betrieben.

### 3.2.2 Paradigma Pelletti II SR 203

Der Paradigma Pelletti II SR 203 verfügt über eine Unterschubfeuerung (Abbildung 3.1). Zunächst werden die Holzpellets aus dem Vorratsbehälter über eine Förderschnecke in die Mitte des Behälters transportiert, wo sie durch ein Brandschutzventil auf eine zweite Förderschnecke fallen. Diese fördert die Holzpellets weiter von unten auf den Brennerteller. Nach der Zündung durch den Glühstab verbrennen bzw. entgasen dort die Holzpellets. Die Zufuhr von Verbrennungsluft über ein Gebläse erfolgt sowohl in den Bereich auf dem Brennerteller (Primärluft) als auch in die Brennkammer (Sekundärluft). Über dem Brennerteller liegt die Brennkammer, in der durch Zugabe von Sekundärluft die aufsteigenden Brenngase weiter verbrannt werden. Die entstehende Wärme wird über einen Wärmeübertrager an das Kesselwasser abgegeben. Die im Betrieb anfallende Asche wird durch den nachrückenden Brennstoff vom Brennerteller in den darunter liegenden Aschesammelbehälter geschoben (siehe Abbildung 3.2).

Die Regelung des Pelletti erfolgt nur zur Leistungsanpassung, d.h. bei sinkendem Wärmebedarf wird die Leistung des Kessels bis minimal 30 % der Nennwärmeleistung verringert. Dies erfolgt durch Erhöhung der Pausenzeit und Verringerung der Betriebszeit der Förderschnecke. Im Vollastbetrieb wird die Förderschnecke immer mit derselben Taktung betrieben. Der Verbrennungszustand (z.B. Sauerstoffgehalt) wird nicht erfasst oder geregelt. Eine automatische Regulierung der Gebläseleistung erfolgt nicht. Allerdings kann die Gebläseleistung manuell, z.B. durch den Kundendienst, verändert werden. Im Rahmen der Verbrennungsversuche wurden die Werkseinstellungen der Anlage verwendet.

### 3.2.3 Viessmann Vitolig 300 VL3A

Der Vitolig 300 VL3A ist mit einer Abwurfffeuerung und Brennerschale ausgerüstet (siehe Abbildung 3.3).

Der Brennstoff wird über die Förderschnecke von oben in den Brennerschale transportiert. Dort findet unter Zugabe von Primär- und Sekundärluft der Verbrennungsprozess statt (Abbildung 3.4a). Unterdruck, der durch das (Abgas-)Saugzuggebläse des VL3A erzeugt wird, sorgt dafür, dass die Verbrennungsluft aus der Umgebung durch Kanäle in die Brennerschale gesaugt wird und dort aus den entsprechenden Öffnungen austritt. Damit unterscheidet sich die Verbrennungsluftzufuhr des VL3A vom Pelletti mit Verbrennungsluftgebläse. Der bewegliche Boden des Brennertopfes ist mit fächerförmig angeordneten Zwischenräumen versehen (Abbildung 3.4b). Diese werden im Betrieb



**Abbildung 3.1:** Schematische Innenansicht des Paradigma Pelletti II SR 203 [Paradigma, 2007]. 1) Bedienteil 2) Regelung 3) Brennkammer 4) Feuerraumtür 5) Aschelade 6) Aschekomprimierung 7) Brennerteller (Unterschubfeuerung) 8) Verkleidung 9) Vorratsbehälter 10) Wärmedämmung 11) Reinigungsmechanik/Wärmetauscher 12) Kesselverkleidung

über eine Regelungsmechanik automatisch geöffnet, um die angefallene Asche zu entfernen. Die Asche fällt zunächst nach unten in die Aschelade und wird anschließend mit einer weiteren Förderschnecke in den Aschesammelbehälter (unterhalb des Pelletvorratsbehälters) transportiert.

Die Regelung des VL3A erfolgt leistungsangepasst wie beim Pelletti. Bei verringertem Wärmebedarf wird die Taktung der Brennstoffförderschnecke verändert und so weniger Brennstoff in den Brennraum transportiert. Damit kann die Wärmeabgabe bis auf 30 % der Nennwärmeleistung verringert werden. Im Vollastbetrieb erfolgt keine Erfassung oder Regelung des Verbrennungszustandes (z.B. Sauerstoffgehalt) und keine Änderung der Taktung der Förderschnecke. Wie beim Pelletti erfolgt beim VL3A im Vollastbetrieb keine Anpassung der Gebläseleistung, d.h. die Luftzufuhr ist konstant.



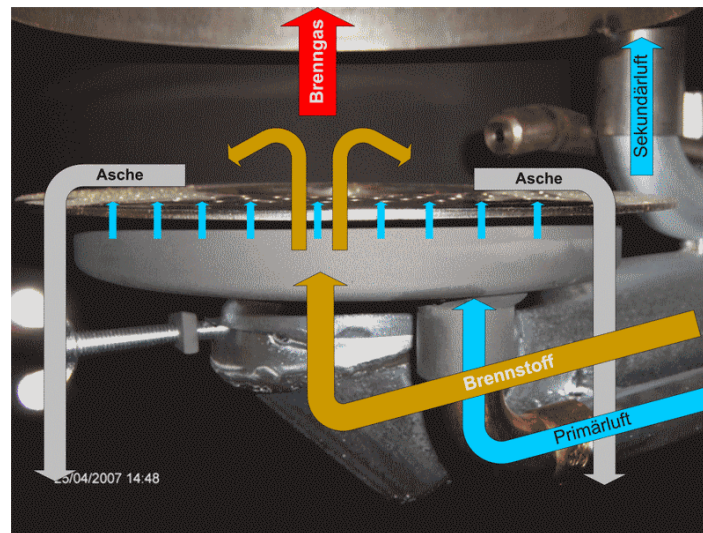


Abbildung 3.2: Detailansicht des Brennertellers beim Paradigma Pelletti II SR 203

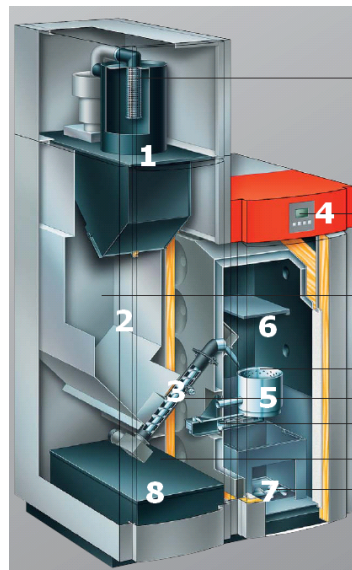
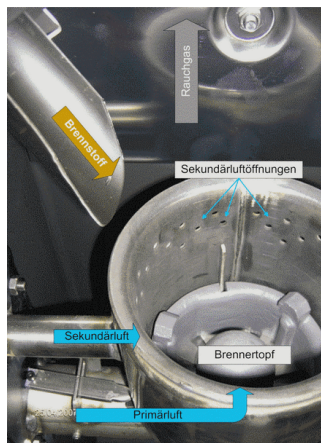
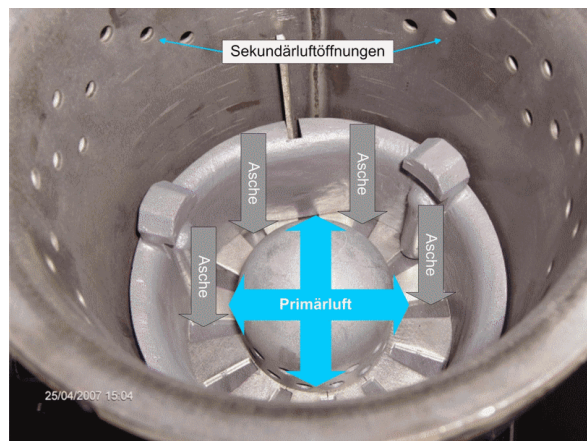


Abbildung 3.3: Schematische Innenansicht des Viessmann Vitolig VL3A [Viessmann, 2006]. 1) Pelletzuführung (an der Versuchsanlage entfernt) 2) Pelletvorratsbehälter 3) Förderschnecke 4) Bedienfeld/Regelung 5) Brennertopf 6) Feuerraum 7) Ascheaustragsystem (Förderschnecke) 8) Aschesammelbehälter



(a) Nahaufnahme Brenn-  
raum



(b) Nahaufnahme Brennertopf

Abbildung 3.4: Detailaufnahmen des Feuerraumes Viessmann Vitolig VL3A

## 3.3 Anlagenspezifische Anpassungen für die Versuchsdurchführung

### 3.3.1 Hintergrund

Um die Vergleichbarkeit der Messwerte zu gewährleisten und Aussagen hinsichtlich des Ascheerweichungsverhaltens treffen zu können, musste sichergestellt werden, dass die Heizungsanlagen mit vergleichbaren Betriebsbedingungen arbeiten. Von Bedeutung hierbei sind

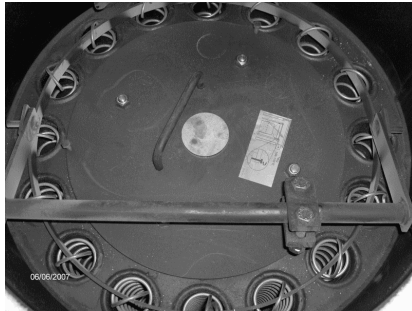
- Nennwärmeleistung (Brennstoff- und Verbrennungsluftzufuhr),
- Lastzustände (Voll- und Teillast),
- Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf,
- Messung der Temperaturen im Glutbett (Ascheschmelzverhalten) und
- Druckbedingungen in der Abgasanlage.

Um gleiche Druckbedingungen in der Abgasanlage sicherzustellen, sind beide Anlagen an eine gemeinsame Abgasanlage angeschlossen. Die Steuerung des Unterdruckes ist durch ein regelbares Saugzuggebläse und Nebenluftvorrichtungen möglich. Der genaue Aufbau ist im Abschnitt 3.4 erläutert. Um die weiteren Bedingungen einzuhalten, wurden je nach Anlage verschiedenen Umbauten vorgenommen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

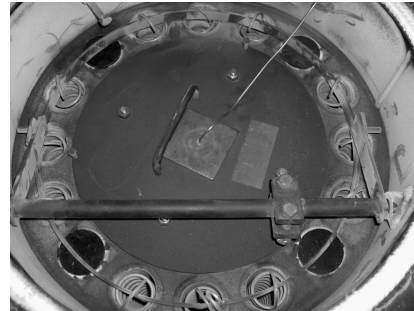
### 3.3.2 Anpassungen am Paradigma Pelletti II SR 203

**Nennwärmeleistung:** Der Pelletti SR II 203 ist für eine Nennwärmeleistung von 20 kW ausgelegt. Da der Viessmann Vitola VL3A eine Nennwärmeleistung von 15 kW besitzt, musste der Pelletti in der Leistung reduziert werden, um vergleichbare Verbrennungsbedingungen (Luft- und Brennstoffzufuhr) und damit vergleichbare Abgaswerte zu erhalten. Für die Reduzierung der Leistung war eine Anpassung der Brennstoff- und Verbrennungsluftzufuhr sowie der Förderrate der Kesselkreispumpe notwendig. Die Anpassung von Brennstoff- und Verbrennungsluftzufuhr konnte durch Umschalten der Regelung von 20 kW auf 15 kW erreicht werden.

Zur Anpassung der Förderrate der Kesselpumpe wurde diese in der Leistung reduziert, so dass diese einer 15 kW Anlage entspricht. Zusätzlich war ein Umbau des Wärmetauschers notwendig, um den Abgasmassenstrom zu begrenzen. Beim Umbau wurden vier Reinigungsfedern im Wärmetauscher entfernt und die freien Öffnungen mit Blindstopfen verschlossen (Abbildung 3.5a und 3.5b). Sämtliche Änderungen zur Leistungsreduzierung fanden in Absprache mit dem Paradigma Kundendienst statt, um einen fachgemäßen Betrieb sicherzustellen.



(a) ohne Leistungsreduzierung



(b) mit Leistungsreduzierung

**Abbildung 3.5:** *Wärmetauscher des Pelletti II SR 203*

**Lastzustände:** Für den Betrieb unter Vollast wurde der Pelletti im Handbetrieb mit Vorgabe der Kesselsolltemperatur auf 75 °C betrieben. Durch entsprechende Wärmeabnahme war ein dauerhafter Vollastbetrieb möglich. Für Teillastversuche wurde die Kesselleistung über die Regelung auf 30 % begrenzt und die Wärmeabnahme entsprechend angepasst.

**Temperaturspreizung Vor-/Rücklauf:** Um eine vergleichbare und stabile Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf sicherzustellen, mussten am Pelletti keine Umbauten vorgenommen werden, da dieser im Auslieferungszustand bereits über eine Rücklaufanhebung verfügt. Damit konnte selbst bei relativ kalten Rücklauftemperaturen (z.B. 30 °C) eine gleichbleibende Kessel- und damit Vorlauftemperatur von 75 °C sichergestellt werden und so eine Kondensatbildung und damit verbundene Korrosion im Wärmetauscher verhindert werden.

**Messung der Glutbetttemperatur:** Für genaue Aussagen zum Ascheerweichungsverhalten der Holzpellets im Pelletti wurde im Glutbett ein Temperaturfühler mit ca. 5 mm Abstand zum Brennteller installiert (Abbildung 3.6). Dieser wurde an einen Datenlogger angeschlossen, mit dem eine Temperaturerfassung über den gesamten Versuchszeitraum möglich ist. Beim Auftreten von Ascheerweichung können damit Rückschlüsse auf die Ascheerweichungstemperatur gezogen

werden.



**Abbildung 3.6:** *Lage des Temperaturfühlers zur Erfassung der Temperatur im Glutbett beim Pelletti II SR203 (Aufnahme beim Betrieb unter Vollast mit Holzpellets 2,0% Maisstärke als PHM)*

#### 3.3.3 Anpassungen am Viessmann Vitolog 300 VL3A

**Nennwärmeleistung:** Hinsichtlich der Nennwärmeleistung waren keine Anpassung notwendig, da die Leistung des VL3A 15 kW beträgt.

**Lastzustände:** Bei Inbetriebnahme des VL3A war nur der Betrieb ohne Automatik vorgesehen, da für den Automatikbetrieb ein Außen- sowie ein Vorlauftemperaturfühler notwendig sind. Da allerdings im Handbetrieb keine Abfragen, insbesondere zur momentanen Leistung, über das Bedienfeld möglich sind, wurden Anpassungen an der Regelung vorgenommen, um den VL3A im Automatikbetrieb ohne Außentemperaturfühler<sup>1</sup> betreiben zu können. Dieser wurde nach Rücksprache mit dem Kundendienst durch einen entsprechenden Widerstand ersetzt, so dass für die Regelung permanent eine Außentemperatur von  $-10^{\circ}\text{C}$  simuliert wird. Zusätzlich wurde ein Vorlauftemperaturfühler installiert, so dass insgesamt ein automatischer Betrieb und damit eine Abfrage des Betriebszustandes über das Bedienfeld möglich war. So konnte in jedem Betriebspunkt der Anlage deren Leistung über das Bedienfeld abgefragt werden. Für den Betrieb im Teillastbereich

---

<sup>1</sup>Der Außentemperaturfühler gibt im Praxisfall die tatsächliche Außentemperatur an die Kesselregelung weiter, um über einen Abgleich der Außentemperatur und der momentanen Wärmeanforderung (Temperatur Vorlauf/Rücklauf) einen optimierten Lastgang des Kessels zu steuern und hohe Taktungsintervalle (Wechsel zwischen Kesselbetrieb an/aus) zu vermeiden.

kann die maximale Kesselleistung über die Regelung auf 30 % begrenzt werden. Die Wärmeabnahme wird dabei entsprechend angepasst.

**Temperaturspreizung Vor-/Rücklauf:** Für eine gleichmäßige Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf wurde nachträglich eine Viessmann-Rücklaufanhebung im System installiert. Diese ist mit einer manuellen Bedienung versehen, so dass die Rücklaufftemperatur gezielt beeinflusst werden kann.

**Messung der Temperatur im Glutbett:** Bei Betrieb des VL3A verbleibt die Asche zunächst auf dem Boden der Brennerschale bevor sie durch die Reinigungsmechanik entfernt wird. Deshalb wurde ein Temperaturfühler in ca. 5 mm Abstand zum Boden der Brennerschale angebracht (Abbildung 3.7). Der Messfühler wurde nach Rücksprache mit dem Hersteller durch die obere Wandung des Feuerraumes geführt.

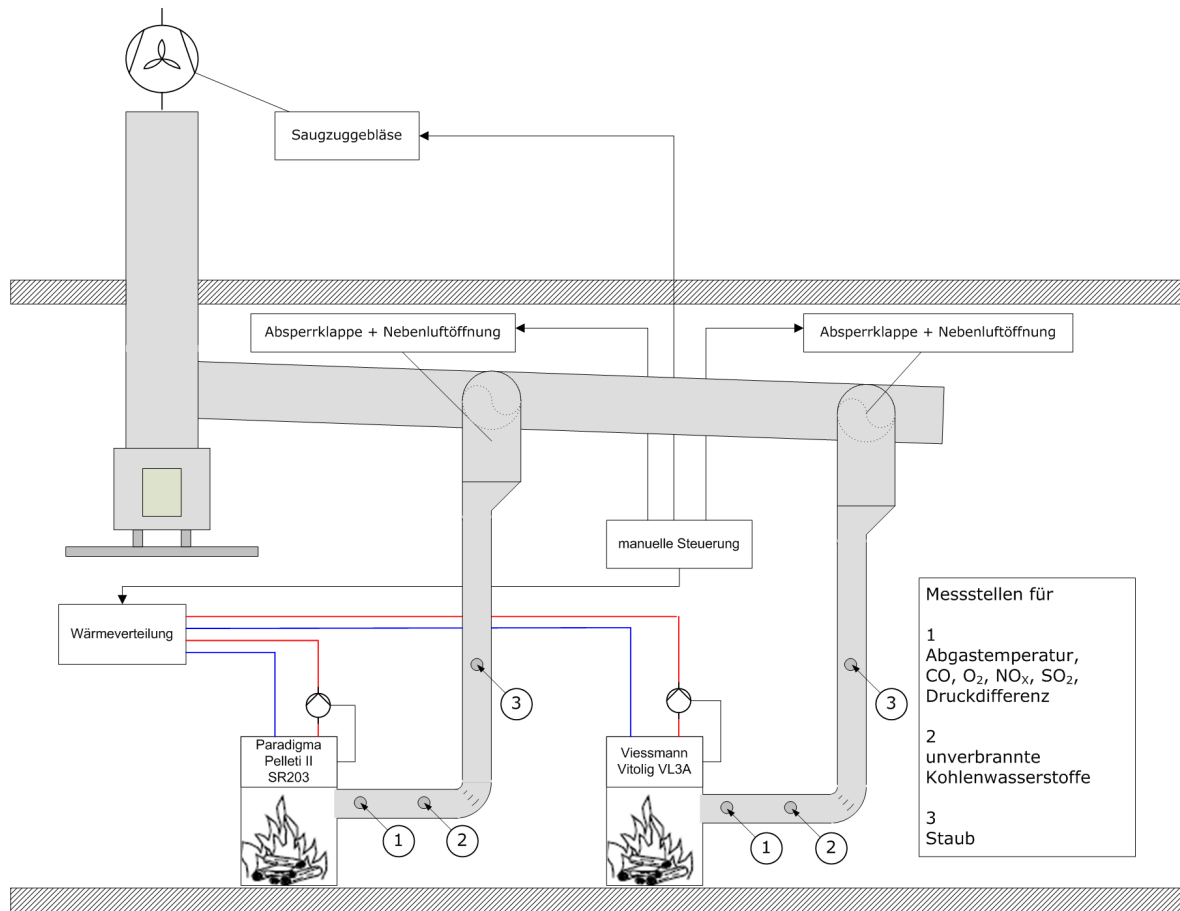


**Abbildung 3.7:** Lage des Temperaturfühlers zur Erfassung der Temperatur im Glutbett beim Viessmann VL3A (Aufnahme beim Betrieb unter Vollast mit Holzpellets 1,5 % Roggenmehl als PHM)

## 3.4 Messanordnung

Die bei den Versuchen anfallende Wärme wird über ein Wärmeverteilungssystem kontrolliert in das Gebäudeheiznetz eingespeist. Besteht kein Wärmebedarf im Gebäudenetz kann die Wärme über Lufterhitzer an die Umgebung abgegeben werden. Der räumliche Aufbau des Versuchsstandes ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

In den Abgasstrecken der einzelnen Feuerungsanlagen sind jeweils drei Messstellen zur Emissionsmessung integriert. Das Abgassystem ist mit einem regelbaren Saugzuggebläse sowie Nebenluftvorrichtungen versehen. Damit können beide Anlagen mit konstantem Unterdruck in der Abgasstrecke betrieben werden. Weiterhin sind die Abgasleitun-



**Abbildung 3.8:** Räumliche Anordnung des Versuchsstandes

gen zu den Anlagen mit motorischen Absperrrklappen versehen. Durch Verschluss dieser Absperrrklappen kann ein reproduzierbarer Unterdruck auch beim Betrieb von nur einer Anlage erzeugt werden. Die Abgasrohre beider Anlagen besitzen einen Durchmesser von 130 mm und sind mit jeweils drei Entnahmestutzen für die Emissionsmessung versehen. Bei jeder Messung wurden die Entnahmesonden im Kernstrom platziert, um vergleichbare Bedingungen zu erhalten. An Messpunkt eins war das Messgerät Eheim Visit 02S angeschlossen mit dem die Abgastemperatur, die Lufttemperatur, sowie die Gehalte von Kohlenmonoxid, Stickoxid, Schwefeldioxid und Sauerstoff im Abgas erfasst wurden. Der Gesamtkohlenstoffgehalt wurde mit dem Testa FID 2010 T ermittelt, welches an Messpunkt zwei angeschlossen war. Mit ausreichendem Abstand zu den anderen Messpunkten erfolgte an Punkt 3 die Staubmessung. Die Entnahmesonden des Eheim Visit 02S und des Testa FID 2010 T wurden beheizt, um Kondensation des Wasserdampfes im Abgas und eventuelle Reaktion von Abgasbestandteilen mit Wasser zu verhindern.

## 3.5 Messtechnik

### 3.5.1 Messumfang

Im Rahmen der Messungen zum Emissionsverhalten der verschiedenen Holzpellets wurde die Konzentration folgender Größen im Abgas gemessen:

- Kohlenmonoxidgehalt ( $\text{CO}$ ),
- Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ),
- Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ),
- Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ),
- Staub,
- dampf- und gasförmige organische Stoffe (Gesamtkohlenstoffgehalt).

Darüber hinaus wurden als Betriebsparameter der Feuerungsanlage die

- Abgastemperatur,
- Verbrennungslufttemperatur,
- Glutbetttemperatur,
- Feuerungsanlagenlaufzeit und
- Brennstoffverbrauch der Feuerungsanlagen

erfasst. Art und Umfang der Datenerfassung zeigt Tabelle 3.2.

Messgrößen, die für die Bewertung herangezogen wurden sind mit  $B_1$  gekennzeichnet. Mit  $B_2$  sind die Größen bezeichnet, die als Zwischengrößen für Berechnungen (z.B. des Abgasverlustes) notwendig waren, aber nicht zur Bewertung herangezogen wurden. Die Laufzeit sowie der Brennstoffverbrauch dienten lediglich zur Feststellung des jeweiligen Betriebszustandes, sie werden nicht als Bewertungsgröße verwendet. Ebenfalls nicht zur Bewertung herangezogen wurde der  $\text{SO}_2$ -Gehalt im Abgas, da dieser bei beiden Anlagen im Normalbetrieb bei  $0 \text{ mg/Nm}^3$  lag.



**Tabelle 3.2:** Art und Umfang der Messdatenerfassung

Messgröße	Speicherintervall	Messumfang	Bewertungsgröße - $B_1$ / Berechnungsgröße - $B_2$
CO-Gehalt	10 s	$\approx 2$ h	$B_1$
NO <sub>x</sub> -Gehalt	10 s	$\approx 2$ h	$B_1$
SO <sub>2</sub> -Gehalt	10 s	$\approx 2$ h	-
O <sub>2</sub> -Gehalt	10 s	$\approx 2$ h	$B_1$
Staub	-	30 min	$B_1$
Gesamt-C-Gehalt	10 s	$\approx 2$ h	$B_1$
Abgastemperatur	10 s	$\approx 2$ h	$B_2$
Verbrennungsluft- temperatur	10 s	$\approx 2$ h	$B_2$
Glutbetttemperatur	60 s	kontinuierlich	$B_1$
Laufzeit	manuell	Stichprobe	
Brennstoffverbrauch	manuell	Stichprobe	

### 3.5.2 Kontinuierlich erfasste Messgrößen

Eine Übersicht der kontinuierlich erfassten Messgrößen zeigt Tabelle 3.3. Die Messdatenerfassung erfolgte in 10 s-Intervallen. In Bezug auf die 1.BImSchV wurden aus den Messwerten 15 min-Mittelwerte gebildet, die für eine bessere Vergleichbarkeit auf einen Bezugssauerstoff von 13 % umgerechnet wurden (Gleichung 3.1).

$$E_{\text{bei } 13\%O_2} = \frac{21 - \gamma_{O_2, \text{Bezug}}}{21 - \gamma_{O_2, \text{gemessen}}} \cdot E_{\text{bei } O_2, \text{gemessen}} \quad (3.1)$$

### 3.5.3 Diskontinuierlich erfasste Messgrößen

Zur Bestimmung des Staubgehaltes wurde aus dem Abgasstrom eine definierte Abgasprobe isokinetisch entnommen, d.h. der abgezwigte Volumenstrom wurde mit der im Abgasrohr vorhandenen Strömungsgeschwindigkeit abgesaugt, um eine Ablenkung der Staubpartikel zu verhindern. Die Anordnung wurde so gewählt, dass durch die Entnahme der Probe keine Beeinflussung der anderen Entnahmepunkte erfolgte (siehe Abbildung 3.8). Der Messaufbau und die Bestimmung des Staubgehaltes erfolgte

**Tabelle 3.3:** *Kontinuierlich erfasste Messgrößen sowie Messprinzip und Messbereich*

Messgerät	Messgröße	Messprinzip	Messbereich
EHEIM VISIT 02S	O <sub>2</sub> -Gehalt	elektrochemisch	0 – 21 Vol. – %
	CO-Gehalt	elektrochemisch	0 – 10.000 ppm
	NO-Gehalt	elektrochemisch	0 – 4.000 ppm
	SO <sub>2</sub> -Gehalt	elektrochemisch	0 – 4.000 ppm
	Abgastemperatur	thermoelektrisch (Thermoelement Typ K)	(–30... + 800) °C
	Verbrennungs- lufttemperatur	thermoelektrisch (Thermoelement Typ K)	(–30... + 200) °C
	Differenzdruck	piezoelektrisch	±10 kPa
TESTA FID 2010 T	Gesamtkohlenstoffgehalt	Flammenionisation	0 – 10 Vol. – %

in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2066 [2006]. Aufgrund des geringen Durchmessers des Abgasrohres (120 mm) wurde der Filter zur Aufnahme der Staubpartikel außerhalb des Abgasrohres angeordnet und entsprechend beheizt, um eine Kondensation zu verhindern. Gemäß den Anforderungen der VDI-Richtlinie 2066 [2006] wurde über einen Zeitraum von 30 Minuten eine definierte Abgasmenge abgesaugt. Für alle Staubmessungen kamen hochtemperaturbeständige Quarz-Planfilter zum Einsatz. Diese wurden sowohl vor als auch nach der Staubmessung im Trockenschrank über mindestens eine Stunde bei ca. 180 °C ausgeheizt und danach für mindestens eine weitere Stunde in einem Exsikkator abgekühlt. So konnten Ungenauigkeiten bei der Wägung durch Wasseraufnahme des Filters weitgehend vermieden werden.

## 3.6 Versuchsprogramm

Der Versuchsstand mit den zwei Feuerungsanlagen sowie die Messtechnik wurden im Rahmen dieser Arbeit erstmalig in Betrieb genommen. Daraus ergab sich zunächst eine mehrwöchige Inbetriebnahmephase, die sich in

- Funktionstest der Feuerungsanlagen (Brennstoffzufuhr, Verbrennungsluftzufuhr, Regelung von Voll- und Teillast),
- Umbauten an den Feuerungsanlagen (Leistungsanpassung, Installation von Temperaturfühlern),

- Funktionstest der Abgasanlage (Druckbedingungen, Wetterabhängigkeit),
- Verhalten des Wärmeverteilungssystems bei Betrieb mehrerer Anlagen und
- Funktionstest der Messtechnik (Kalibration, Dauerbetriebsfähigkeit)

gliederte. Ziel der Inbetriebnahmephase war es, das Verhalten des Gesamtsystems einschätzen zu können, um so bei den späteren Versuchen möglichst gleichmäßige Bedingungen sicherzustellen.

An die Inbetriebnahmephase anschließend erfolgte die Durchführung der Verbrennungsversuche. Das Versuchsprogramm dieser Tests ist in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

**Tabelle 3.4:** *Versuchsprogramm*

Bezeichnung	Holzpellets	Anlage	Messumfang	
			15 min-Mittelwerte	30 min-Einzelmessung
			CO, NO <sub>x</sub> O <sub>2</sub> , TOC	Staub
Langzeitversuche ( $\approx 95$ h Betrieb)	mit 2,0 % Maisstärke	VL3A	11	-
		Pelletti	7	-
	mit 1,5 % Roggenmehl	VL3A	16	3
		Pelletti	10	2
Kurzzeitversuche ( $\approx 24$ h Betrieb)	ohne PHM (Referenz)	VL3A	14	2
		Pelletti	9	2
	mit 1,5 % Kartoffelstärke	VL3A	9	2
		Pelletti	9	2
Kurzzeitversuche ( $\approx 24$ h Betrieb) zerkleinerte Holzpellets	ohne PHM	VL3A	8	2
		Pelletti	9	2
	mit 1,5 % Kartoffelstärke	VL3A	9	2
		Pelletti	8	2
	mit 1,5 % Roggenmehl	VL3A	9	2
		Pelletti	9	2
	mit 1,5 % Weizenstärke	VL3A	9	2
		Pelletti	8	2

## 4 Versuchsergebnisse

In den nachfolgenden Abschnitten erfolgt die Analyse und Bewertung der im Rahmen dieser Diplomarbeit gemessenen und berechneten Werte. Ziel ist es, den Einfluss der Faktoren Presshilfsmittel, Pelletqualität (hinsichtlich Stückigkeit und Festigkeit) und Feuerungstechnik zu erkennen. Dafür wird deren Einfluss auf das Emissionsverhalten ( $\text{CO}$ -,  $\text{NO}_x$ -, TOC und Staubgehalt im Abgas), den Anlagenbetrieb (Förderraten, Abgasverlust, Luftüberschuss) und das Ascheerweichungsverhalten (Temperatur im Glutbett) näher untersucht.

### 4.1 Pelletlängen und Förderrate

Da beide Anlagen mit konstanter Drehzahl der Förderschnecke im Volllastbetrieb arbeiten, wirken sich Änderungen der Förderraten direkt auf den Verbrennungsprozess aus, da dann andere Luft-/Brennstoffbedingungen im Feuerraum vorliegen. Um Veränderungen des Emissionsverhaltens oder des Abgasverlustes bewerten zu können, ist deshalb eine Betrachtung der Förderraten in Abhängigkeit vom Brennstoff sinnvoll. Untersucht wurden die Pellets im Original- und zerkleinerten Zustand, welcher Transport- und Verladevorgänge simulieren sollte (siehe 3.1).

Der Brennstofftransport in beiden Anlagen wird über Förderschnecken realisiert. Aufgrund der geringen Gewindeabstände beider Schnecken transportieren diese bei Vorhandensein von längeren Pellets eine geringere Menge in den Feuerraum. Liegen relativ viele lange Pellets vor, müssen diese erst von der Förderschnecke zerkleinert werden, bevor sie in die Gewindegänge der Schnecke passen. Durch die Verwendung von PHM verringert sich der Abrieb, die Festigkeit der Pellets steigt. Dies ist auch bei der Längenverteilung erkennbar. Die Pelletchargen mit Kartoffelstärke und Roggenmehl weisen einen höheren Anteil längerer Pellets auf (Abbildung 4.1). Der höhere Anteil längerer Pellets führt zu einer verringerten Förderrate bei Pellets mit Kartoffelstärke und Roggenmehl (Abbildung 4.2).

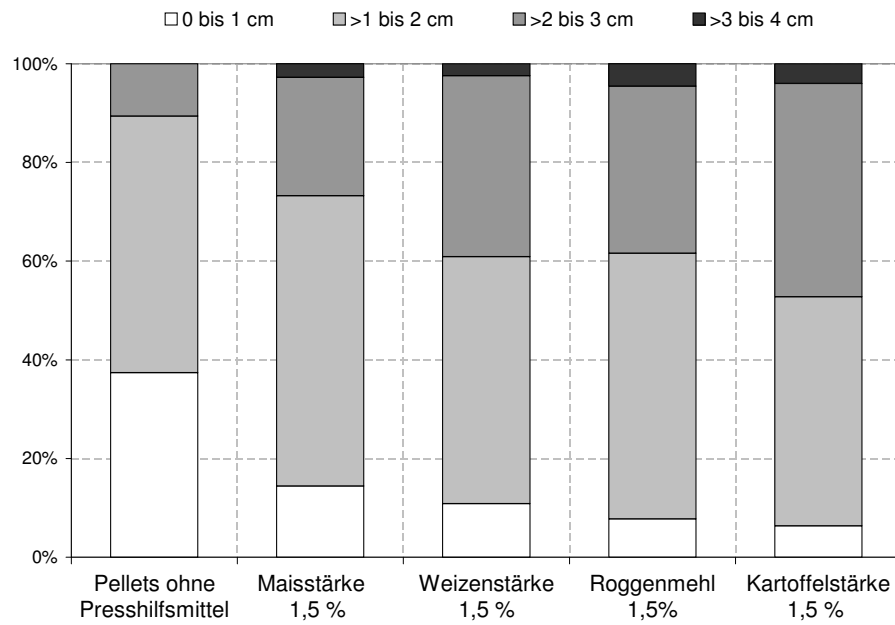


Abbildung 4.1: Längenverteilung der untersuchten Holzpellets (alle Pellets < 4 cm)

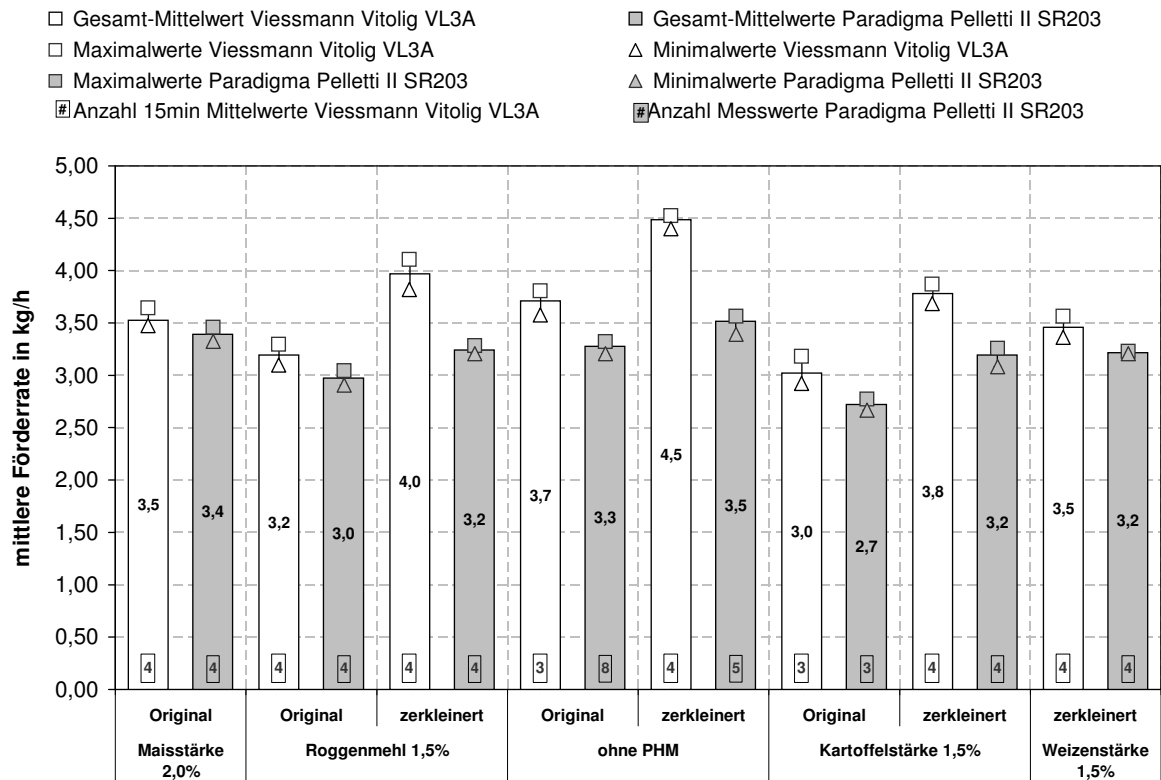


Abbildung 4.2: mittlere Brennstoffförrerate in kg/h in Abhängigkeit vom Brennstoff

**Anlagenart:** Aufgrund seiner Konstruktion mit zwei Förderschnecken (1 im Vorratsbehälter, 1 in den Brennraum; siehe Abbildung 3.1), sowie deren geringem Durchmesser, zeigt der Pelletti bei allen Pelletchargen eine geringere Förderrate als der VL3A. Dieser Unterschied bewegt sich im Bereich von 0,1 kg/h (Holzpellets mit Maisstärke) bis 1,0 kg/h (zerkleinerte Holzpellets ohne Presshilfsmittel).

**Presshilfsmittel:** Beide Anlagen fördern erheblich weniger der längeren, festeren Pellets mit Roggenmehl und Kartoffelstärke. So sinkt die Förderrate im Vergleich zu Holzpellets ohne Presshilfsmittel beim VL3A von 3,7 kg/h auf 3,2 kg/h (Pellets mit Roggenmehl) bzw. 3,0 kg/h (Pellets mit Kartoffelstärke). Beim Pelletti sinkt die Förderrate von 3,3 kg/h bei Holzpellets ohne Presshilfsmittel auf 3,0 kg/h (Pellets mit Roggenmehl) bzw. 2,7 kg/h (Pellets mit Kartoffelstärke). Die bei Pellets mit Kartoffelstärke und Roggenmehl verminderte Förderrate wird nicht durch die Regelung kompensiert (kein Sauerstoffsensor), so dass unter Volllast ein höherer Luftüberschuss auftritt.

**Stückigkeit:** Bei Zerkleinerung der Holzpellets steigt die Förderrate an, da die kleineren Partikel besser von der Förderschnecke transportiert werden können. Aufgrund seiner zwei Förderschnecken ist dieser Effekt beim Pelletti schwächer als beim VL3A. Die zerkleinerten Holzpellets mit Roggenmehl bzw. Kartoffelstärke erreichen ungefähr das Förderniveau von Holzpellets ohne Presshilfsmittel (unzerkleinert).

**Fazit:**

*Trotz des geringen Anteils von maximal 2,0 % Presshilfsmitteln hat dieses erheblichen Einfluss auf die Festigkeit und damit verbunden auf die Längenverteilung der Holzpellets. Die Festigkeit und Längenverteilung wiederum bestimmen maßgeblich die Förderrate der Förderschnecken bei den untersuchten Anlagen. Da die Förderschnecke bei beiden Anlagen im Volllastbetrieb immer mit derselben Taktung betrieben wird, führen verminderte Förderraten, je nach Konstruktion der Feuerungsanlage, auch zu einem verminderten Brennstoffmassenstrom.*

## 4.2 Feinanteil im Betrieb

Der Transport der Pellets mittels Förderschnecke bewirkt eine Zerkleinerung, die zu einer Erhöhung des Feinanteils<sup>1</sup> führt. Bei weniger festen Pellets tritt dieser Effekt deutlicher auf. Um den Zerkleinerungseffekt der Förderschnecken zu quantifizieren, wurde der Feinanteil für Holzpellets ohne Presshilfsmittel und mit 1,5 % Kartoffelstärke jeweils im Auslieferungszustand (Original) und nach Durchgang durch die Schnecke des VL3A und des Pelletti bestimmt (Abbildung 4.3).

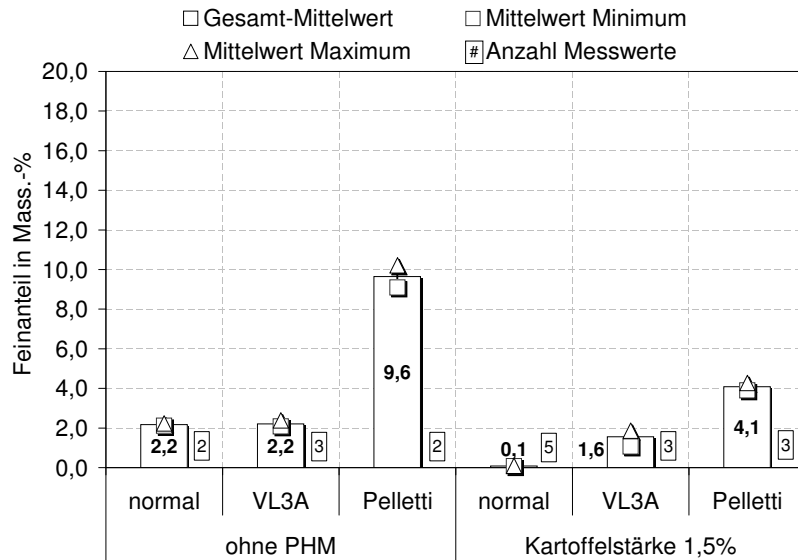
Deutlich erkennbar ist der Einfluss der zwei Förderschnecken des Pelletti, es findet eine stärkere Erhöhung des Feinanteils durch den Transport als beim VL3A statt (Abbildung 4.3). Aufgrund der höheren Festigkeit der Pellets mit Kartoffelstärke werden sie weniger stark mechanisch beansprucht und es entsteht weniger Feinanteil als bei den Pellets ohne PHM. Dieser Effekt tritt ebenso im zerkleinerten Zustand auf.

### Fazit:

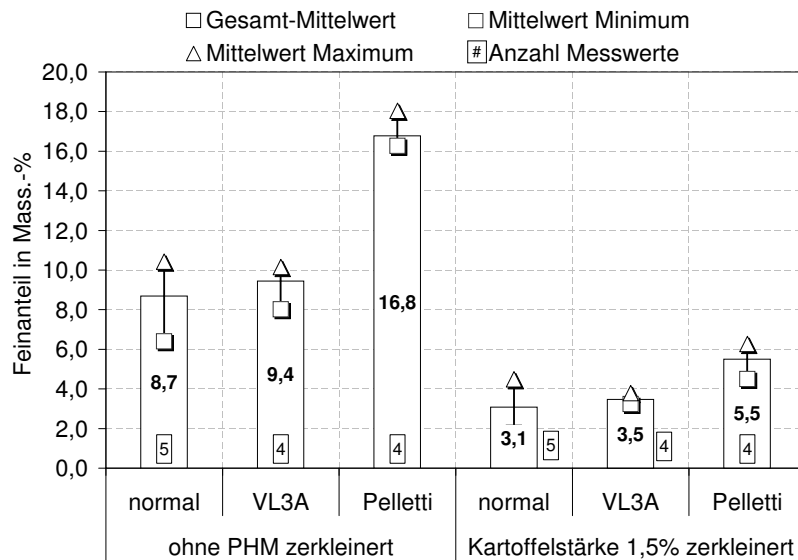
*Das Brennstofftransportsystem der Feuerungsanlagen kann maßgeblichen Einfluss auf die Qualität der im Brennraum ankommenden Holzpellets haben. Werden die Holzpellets durch mehrere Transportstufen (Förderschnecken) höheren mechanischen Belastungen ausgesetzt, erhöht sich der Feinanteil. Dieser Effekt kann durch den Einsatz von Presshilfsmitteln verringert werden. Es besteht die Gefahr, dass bei einem extrem hohen Feinanteil der Brennstofftransport gänzlich versagt, da das Pelletmaterial eine zu geringe Stückigkeit aufweist, um von der Förderschnecke transportiert zu werden. Dies würde zu einem Ausfall der Wärmeversorgung führen.*

---

<sup>1</sup>Anteil mit Partikelgrößen  $< 3,15$  mm nach DIN CEN/TS 15149-2:2006-04 [2006]



(a) nicht zerkleinert



(b) zerkleinert

Abbildung 4.3: mittlerer Feinanteil in % von Holzpellets ohne Presshilfsmittel und mit 1,5 % Kartoffelstärke nach Durchgang durch die Förderschnecke

## 4.3 Luftüberschuss

Beide Anlagen weisen im Vergleich zu konventionellen, fossilen Feuerungsanlagen (Heizöl EL bzw. Erdgas und Gebläsebrenner  $\lambda \approx 1,2$  [ZIV, 1999]) relativ hohe Luftüberschusszahlen von minimal 2,2 (VL3A) bzw. 2,4 (Pelletti) beim Betrieb mit Holzpellets



ohne Presshilfsmittel auf (Abbildung 4.4). Maximal werden sogar Werte von 3,9 beim VL3A bzw. 3,1 beim Pelletti (Holzpellets mit 1,5 % Roggenmehl) erreicht. Auch im Vergleich mit üblichen Werten für Biomassefeuerungsanlagen von 1,4 bis 1,8 nach Nussbaumer [2001] erscheinen die gemessenen Werte sehr hoch.

**Feuerungsprinzip:** Bei der Abwurffeurung treten größere Veränderungen beim Wechsel der Pelletchargen auf. Der Einfluss von Pelletfestigkeit, Förderrate und Luftüberschuss scheint dort stärker als beim Unterschubsystem zu sein. So zeigen sich die höchsten (3,9 bei Holzpellets mit 1,5 % Roggenmehl) als auch die niedrigsten (2,2 bei Holzpellets ohne Presshilfsmittel) Luftüberschusszahlen beim VL3A. Die Bandbreite der Veränderung des Luftüberschusses beträgt beim VL3A damit rund 1,7, während diese beim Pelletti nur 0,7 beträgt. Zudem zeigt der VL3A bei den Holzpellets mit Presshilfsmittel einen höheren Luftüberschuss als der Pelletti. Eine Ausnahme bilden hier die Holzpellets ohne Presshilfsmittel, bei diesen weist der Pelletti einen höheren Luftüberschuss auf.

**Presshilfsmittel:** Bei der Verbrennung der festen Pellets mit Kartoffelstärke und Roggenmehl können höhere  $\lambda$ -Werte als bei Holzpellet ohne PHM gemessen werden. So erhöht sich der Luftüberschuss beim Einsatz von Kartoffelstärke von 2,2 auf 3,8 (VL3A) bzw. von 2,4 auf 3,0 (Pelletti) und beim Einsatz von Roggenmehl von 2,2 auf 3,9 (VL3A) bzw. von 2,4 auf 3,1 (Pelletti) im Vergleich zu Pellets ohne PHM. Ursache ist vermutlich die bei den Pellets mit Kartoffelstärke und Roggenmehl verringerte Förderrate. Zusätzlich kann auch das Verbrennungsverhalten der Pellets (z.B. die Entgasungsrate) durch die erhöhte Festigkeit beeinflusst werden, so dass die Verbrennung nicht mehr vollständig abläuft und weniger Sauerstoff aus der Verbrennungsluft reagiert.

**Stückigkeit:** Durch die Zerkleinerung kann der Luftüberschuss bei den Holzpellets mit Presshilfsmitteln gesenkt werden, da sich die Förderrate erhöht. Bei Holzpellets ohne Presshilfsmittel erhöht sich der Luftüberschuss. Vermutlich liegen die Brennstoffpartikel durch das Zerkleinern zu dicht zusammen, so dass die Verbrennungsluft nicht an den Brennstoff gelangt. Der Brennstoff wird so nicht komplett umgesetzt und der Luftüberschuss steigt.

### Fazit:

*In beiden Anlagen werden relativ hohe Luftüberschusszahlen von  $\lambda > 2,2$  erreicht. Diese liegen über den üblichen Werten für Biomassefeuerungen von 1,4 bis 1,8 [Nussbaumer, 2001]. Hervorgerufen werden könnten diese hohen Luftüberschüsse zum einen*

durch eine verminderte Brennstoffförderate bei gleichbleibender Luftzufuhr, ausgelöst durch die höhere Festigkeit der Holzpellets mit Presshilfsmitteln. Zusätzlich könnte die erhöhte Festigkeit auch eine negative Beeinflussung der Entgasungsrate bewirken, was zu einem geringeren Umsatz des Luftsauerstoffes im Feuerraum und damit zu einem erhöhten Luftüberschuss führen könnte. Der Effekt der verminderten Förderrate kann durch Zerkleinern der Pellets abgemildert werden, allerdings nur bei den Pellets mit PHM. Bei den Pellets ohne PHM steigt der Luftüberschuss durch die Zerkleinerung an, vermutlich gelangt dann nicht mehr ausreichend Sauerstoff an den Brennstoff, weil dieser zu dicht zusammen liegt.

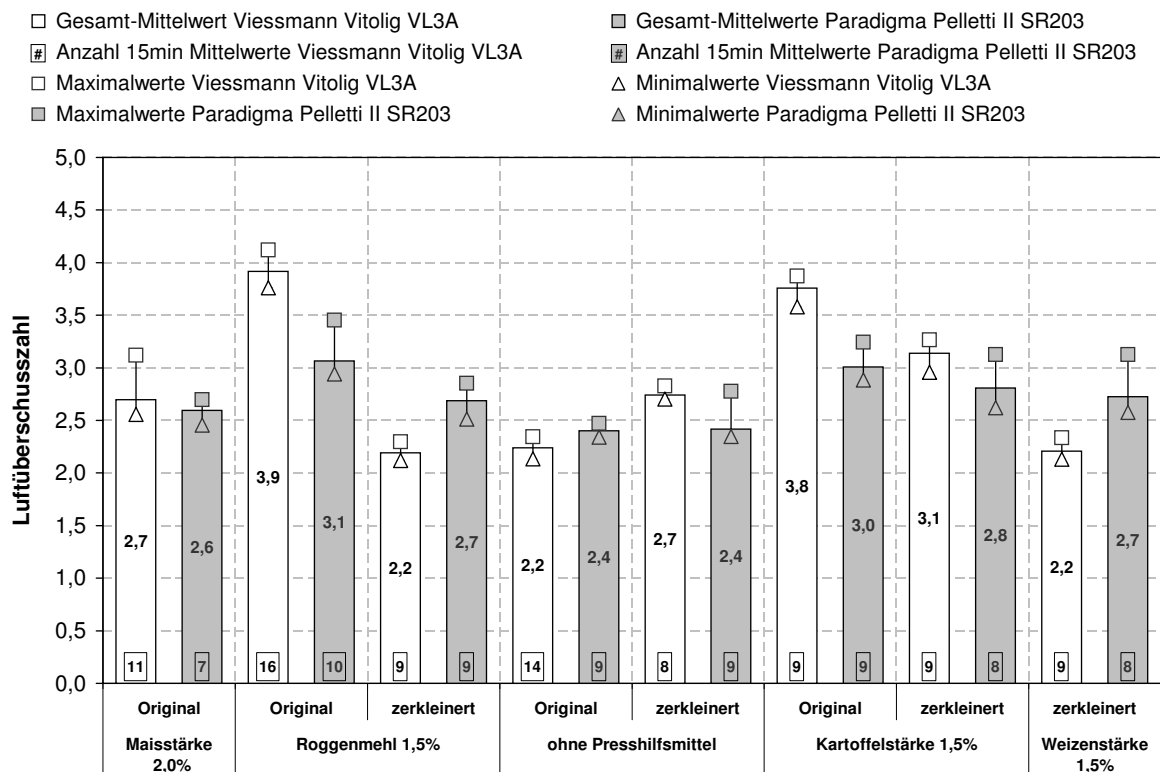


Abbildung 4.4: mittlere Luftüberschusszahl in Abhängigkeit vom Presshilfsmittel

## 4.4 Emissionen

### 4.4.1 Kohlenmonoxid

Der CO-Gehalt im Abgas dient als Bewertungsgröße für die Vollständigkeit der Verbrennung. So deuten hohe CO-Gehalte auf eine unvollkommene Verbrennung hin. Im Vergleich zeigen beide Anlagen mit CO-Gehalten von ca.  $350 \text{ mg/Nm}^3$  (Pellets mit Kartoffelstärke) Werte, die über denen üblicher Pelletkessel ( $103 \text{ mg/Nm}^3$  nach Hartmann u. a. [2003c]) und auch über denen konventioneller, fossiler Anlagen (Heizöl EL/Erdgas mit Gebläsebrenner ca.  $8,6 \text{ mg/Nm}^3$  nach Hartmann u. a. [2003c]) liegen (Abbildung 4.5).

**Feuerungsprinzip:** Bei beiden Anlagen unterliegt der Kohlenmonoxidgehalt im Abgas sehr starken Schwankungen. Dieses Verhalten ist unabhängig vom Brennstoff (Abbildung 4.5). Eine Ursache dieser Schwankungen könnte der taktende Betrieb der Förderschnecke sein. Allerdings sind die Schwankungen beim Pelletti im Vergleich zum VL3A weniger stark. Generell liegen beide Anlagen mit maximal  $500 \text{ mg/Nm}^3$  (Pelletti) bzw.  $450 \text{ mg/Nm}^3$  (VL3A) bei der Verbrennung von Holzpellets mit Kartoffelstärke weit unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes der 1.BImSchV von  $4.000 \text{ mg/Nm}^3$ .

**Presshilfsmittel:** Bei beiden Anlagen zeigen die Holzpellets ohne PHM die geringsten CO-Emissionen. Bei der Verbrennung der sehr festen Pellets mit Roggenmehl und Kartoffelstärke entstehen die höchsten CO-Emissionen. Ursache hierfür kann die verringerte Förderrate bei den festen Pellets mit Kartoffelstärke und Roggenmehl sein. Diese führt zu einem verminderten Brennstoffmassenstrom, welcher einen erhöhten Luftüberschuss im Brennraum zur Folge hat. Als Folge kann eine Abkühlung im Brennraum erfolgen, was die vollständige Verbrennung erschwert. Zusätzlich können die Brennstoffpartikel durch die überschüssige Luft schneller aus der Reaktionszone transportiert werden, was wiederum die CO-Bildung begünstigen kann.

**Stückigkeit:** In beiden Anlagen sinken bei der Verbrennung die CO-Emissionen bei Zerkleinerung. Eine Ausnahme bilden die Pellets ohne PHM, bei ihnen steigen die CO-Emissionen an. Vermutlich gelangt ab einem gewissen Feinanteil nicht mehr genügend Sauerstoff an die Brennstoffpartikel, so dass der Verbrennungsprozess negativ beeinflusst wird und erhöhte CO-Emissionen die Folge sind. Hier scheint die Stückigkeit der Holzpellets ohne Presshilfsmittel die untere Grenze für geringe CO-Emissionen darzustellen.

### Fazit:

*Der Einsatz von Pellets mit PHM führt bei den untersuchten Anlagen zu erhöhten CO-Emissionen. Dieser Effekt ist bei dem Kessel mit Abwurfheizung (Brennerschale) stärker zu beobachten als beim Kessel mit Unterschubheizung. Ursache hierfür kann sowohl eine verminderte Förderrate bei stabileren (längeren) Pellets und damit ein zu hoher Luftüberschuss im Feuerraum als auch ein schlechterer Ausbrand bei den festen Pellets sein. Liegt durch lange Transportwege oder andere mechanische Effekte ein hoher Feinanteil vor, führt dieser bei den Pellets mit PHM zu einer Senkung der CO-Emissionen; bei Pellets ohne PHM zu einer Erhöhung. Im Rahmen der durchgeführten Verbrennungsversuche stellen die Holzpellets ohne PHM die untere Grenze der Stückigkeit in Hinsicht auf den CO-Gehalt im Abgas dar. Wird der Feinanteil weiter erhöht, gelangt vermutlich nicht mehr ausreichend Sauerstoff an den Brennstoff, so dass der Verbrennungsprozess negativ beeinflusst werden kann und erhöhte CO-Emissionen auftreten können. Im Vergleich mit dem gesetzlichen Grenzwert von  $4.000 \text{ mg/Nm}^3$  CO für Kleinfeuerungsanlagen (1.BImSchV) relativieren sich allerdings diese Effekte, da sich alle Änderungen im Bereich unter  $500 \text{ mg/Nm}^3$  abspielen.*

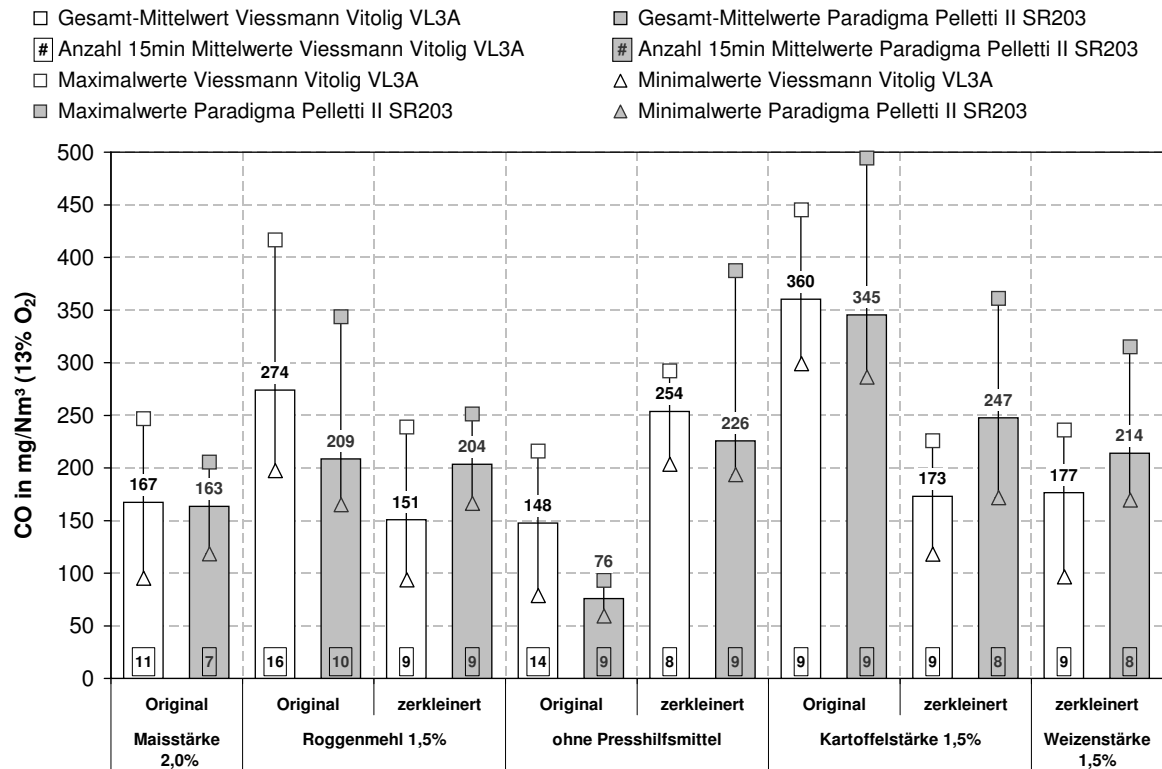


Abbildung 4.5: mittlere Kohlenmonoxidemissionen ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$  bei 13% Sauerstoff) im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoff

## 4.4.2 Stickoxide

Die Stickoxidbildung wird wesentlich durch den Stickstoffgehalt im Brennstoff und die Verbrennungstemperatur beeinflusst (siehe Abschnitt 2.2.3). Die laut Brennstoffanalyse niedrigen Stickstoffgehalte im Brennstoff ( $< 0,4$  Mass. – %, siehe Tabelle F.1) sowie die geringen Verbrennungstemperaturen ( $< 1200^\circ\text{C}$ , siehe Abschnitt 4.5) bestätigen die konstanten und niedrigen  $\text{NO}_x$ -Messwerte (Abbildung 4.6). Im Vergleich mit Literaturwerten typischer Pelletkessel aus Hartmann u. a. [2003c] ( $103 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ) zeigen sich ähnliche Werte. Bei konventionellen, fossilen Feuerungssystemen werden allerdings nur etwa 30 % bis 50 % der Stickoxidemissionen von Pelletkesseln erreicht (Heizöl EL:  $43 - 65 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ , Erdgas  $22 - 39 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ; jeweils mit Gebläsebrenner nach Hartmann u. a. [2003c]).

**Feuerungsprinzip:** Im Gegensatz zum Kohlenmonoxidgehalt ist der Stickoxidgehalt im Abgas bei beiden Anlagen sehr stabil und liegt bei ca.  $90 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ . Maximal emittiert der VL3A  $106 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  und der Pelletti  $93 \text{ mg}/\text{Nm}^3$   $\text{NO}_x$ , jeweils bei

zerkleinerten Pellets mit Roggenmehl. Die geringen Unterschiede bei den verschiedenen Pelletchargen lassen keinen Rückschluss auf einen Einfluss des Feuerungssystems zu.

**Presshilfsmittel:** Wie beim Kohlenmonoxid zeigen auch bei den Stickoxiden die Holzpellets ohne PHM die geringsten und die (festen) Pellets mit Roggenmehl bzw. Kartoffelstärke die höchsten Stickoxidemissionen. Die Unterschiede sind hierbei aber wesentlich geringer. Das  $\text{NO}_x$ -Niveau der Holzpellets mit Maisstärke und der zerkleinerten Pellets mit Weizenstärke liegt bei beiden Anlagen in etwa auf dem Niveau von Holzpellets ohne Presshilfsmittel.

**Stückigkeit:** Die Veränderung der Stückigkeit hat bei beiden Anlagen keine Auswirkungen auf den  $\text{NO}_x$ -Gehalt.

### Fazit

*Der Einsatz von Presshilfsmitteln zur Verbesserung der Pelletfestigkeit führt zu einer geringfügigen Erhöhung der Stickoxidemissionen. Vermutlich wird die  $\text{NO}_x$ -Bildung durch den höheren Luftüberschuss bei den festeren Pellets mit Kartoffelstärke und Roggenmehl begünstigt. In der 1.BImSchV werden hinsichtlich der Stickoxidgrenzwerte keine Anforderungen gestellt. Erst in der TA Luft wird ein  $\text{NO}_x$ -Grenzwert für Anlagen von 50 – 300 MW (Nennwärmeleistung) von 133,33 mg/Nm<sup>3</sup> festgelegt (bei 13% Bezugssauerstoff und Holz als Brennstoff). Beide Anlagen unterschreiten diesen Wert.*

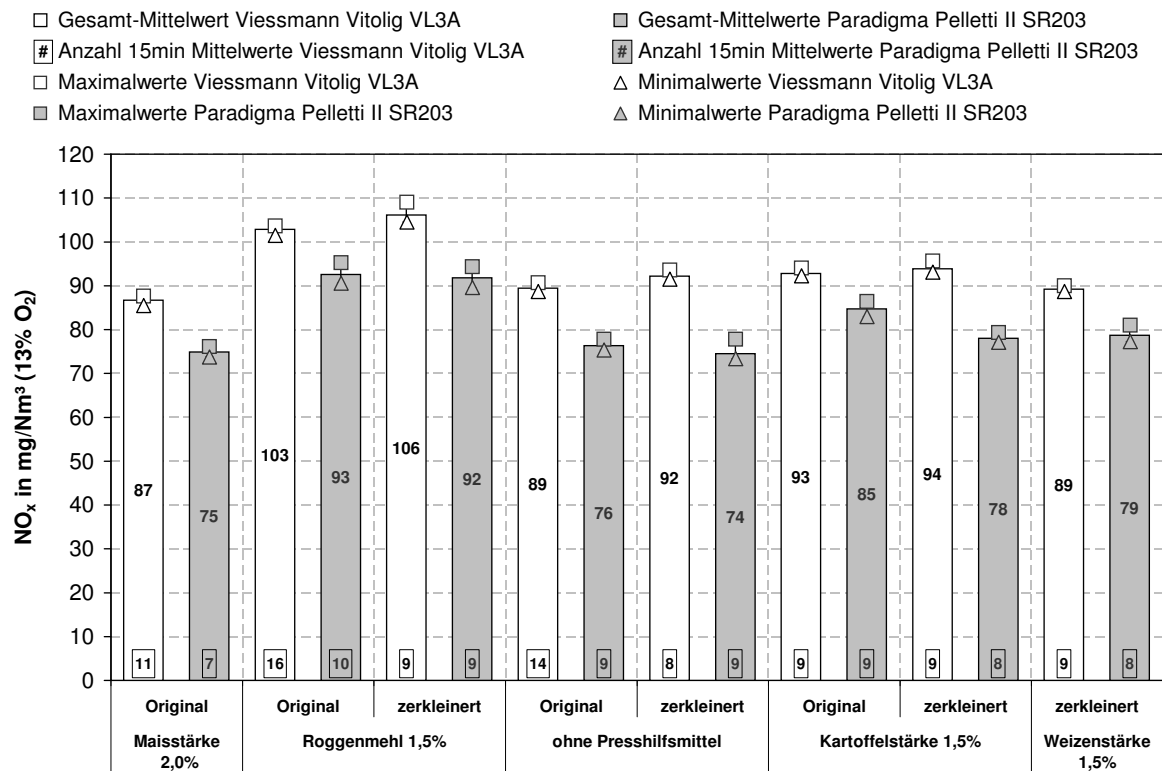


Abbildung 4.6: mittlere Stickoxidemissionen ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$  bei 13% Sauerstoff) im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoff

### 4.4.3 Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC)

Zur Bewertung der Vollständigkeit der Verbrennung kann neben dem CO-Gehalt auch der TOC-Gehalt im Abgas herangezogen werden. Bei beiden Anlagen liegen die TOC-Gehalte unter  $6,5 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ . Wie schon beim CO-Gehalt zeigen sich für den VL3A größere Schwankungsbreiten der TOC-Gehalte im Abgas (Abbildung 4.7). Im Vergleich mit Ergebnissen aus Hartmann u. a. [2003c] für Holzpelletkessel  $< 50 \text{ kW}$  ( $2 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ ) wurden im Rahmen dieser Versuchsreihe allerdings höhere Werte gemessen.

**Feuerungsprinzip:** Unter Berücksichtigung der großen Schwankungsbreiten sind keine Unterschiede bei den TOC-Gehalten im Abgas zwischen Abwurf- und Unterschubfeuerung zu erkennen.

**Presshilfsmittel:** Im Vergleich zu Pellets ohne PHM emittieren beide Anlagen mehr TOC beim Einsatz der Pellets mit Kartoffelstärke und Roggenmehl. Die Erhöhung beträgt allerdings nur rund  $3 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  und liegt damit relativ niedrig. Wie

schon beim CO-Gehalt kann hier der erhöhte Luftüberschuss, ausgelöst durch die verringerte Förderrate Ursache sein.

**Stückigkeit:** Wird der Feinanteil im Brennstoff erhöht, sinken die TOC-Emissionen bei den Pellets mit Presshilfsmitteln. Bei den Pellets ohne PHM erhöhen sich die TOC-Emissionen, ähnlich wie beim CO. Die Erhöhung der TOC-Emissionen könnte, wie beim CO-Gehalt, auf zu dicht liegende Brennstoffpartikel, welche nicht ausreichend mit Sauerstoff versorgt werden und so nicht vollständig verbrennen, zurückgeführt werden.

**Fazit:**

*Im Rahmen der Verbrennungsversuche in dieser Diplomarbeit zeigen die Pellets mit Roggenmehl und Kartoffelstärke höhere TOC-Gehalte im Abgas im Vergleich zu Holzpellets ohne PHM. Bei Verwendung von Maisstärke als Presshilfsmittel werden nur geringfügig höhere TOC-Gehalte im Vergleich zu Holzpellets ohne Presshilfsmittel erreicht. Durch die Erhöhung des Feinanteils (zerkleinerte Pellets) lässt sich der TOC-Gehalt bei den Holzpellets mit PHM senken; bei Holzpellets ohne PHM erhöht sich der TOC-Gehalt mit höherem Feinanteil. Vermutlich führt die bei den festeren Pellets mit Roggenmehl oder Kartoffelstärke verringerte Förderrate zu ungünstigen Luftüberschussbedingungen, die die TOC-Bildung begünstigen. Bei hohem Feinanteil (zerkleinerte Pellets ohne PHM) entstehen bei der Verbrennung vermutlich Zonen, die nicht ausreichend mit Sauerstoff versorgt sind, da die Brennstoffpartikel zu dicht beieinander liegen. Dies könnte ebenfalls eine negative Beeinflussung des Verbrennungsprozesses und damit erhöhte TOC-Gehalte zur Folge haben.*



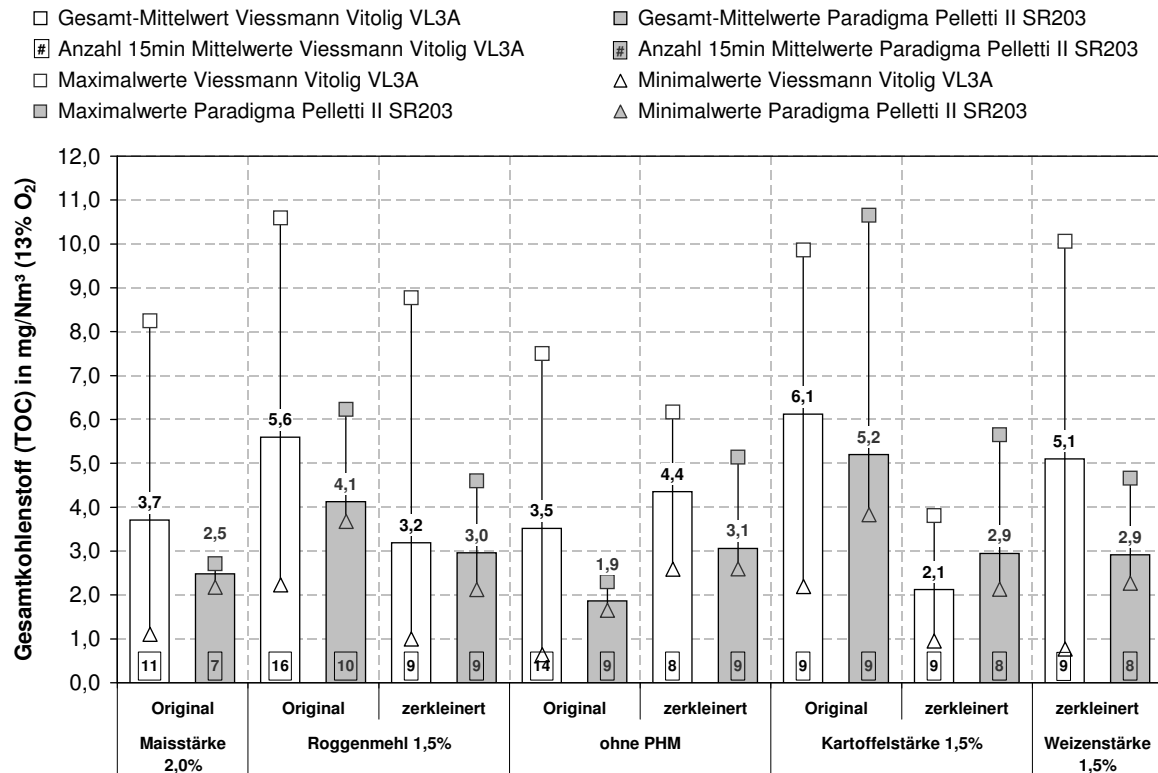


Abbildung 4.7: mittlerer Gesamtkohlenstoffgehalt (TOC) ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$  bei 13 % Sauerstoff) im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoff

#### 4.4.4 Staub

Insbesondere bei Festbrennstofffeuerungen stellen die Staubemissionen einen wesentlichen Anteil am Schadstoffausstoß der Feuerungsanlage dar. Bei der Bewertung der Emissionen ist es daher sinnvoll, die Staubgehalte im Abgas zu bestimmen. Die bei den untersuchten Feuerungsanlagen gemessenen Staubgehalte bewegen sich im Bereich  $< 20 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ . Ähnliche Werte ergaben sich bei Untersuchungen von Hartmann u. a. [2003c] für Pelletkessel  $< 50 \text{ kW}$ . Im Vergleich mit typischen Werten konventioneller, fossiler Feuerungen aus Hartmann u. a. [2003c] für Heizöl EL (bis  $0,2 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  als Ruß) oder Erdgas (kein Staub) liegen diese allerdings höher. Insgesamt wurden bei allen Versuchen in dieser Diplomarbeit Staubgehalte, die unterhalb des Grenzwertes der 1.BImSchV von  $150 \text{ mg}/\text{Nm}^3$  liegen, gemessen (Abbildung 4.8).

Aufgrund des zeitlich eng bemessenen Versuchsprogrammes war es nicht möglich, mehr als zwei Staubmessungen<sup>1</sup> pro Versuchsbrennstoff durchzuführen. Dadurch sind die

<sup>1</sup>jeweils 30 min in Anlehnung an VDI-Richtlinie 2066 [2006]

ermittelten Staubgehalte nur eingeschränkt belastbar hinsichtlich ihrer Aussagekraft.

**Feuerungsprinzip:** Bei allen Verbrennungstests konnten im Abgas des Pelletti höhere Staubgehalte als beim VL3A gemessen werden (Pelletti: maximal  $19,5 \text{ mg/Nm}^3$  bei zerkleinerten Pellets mit Weizenstärke; VL3A: maximal  $13,0 \text{ mg/Nm}^3$  bei zerkleinerten Pellets mit Kartoffelstärke). Ursache ist vermutlich die im Vergleich zur Abwurfffeuerung größere Aschemenge, die auf dem Brennteller lagert. Aus dieser Aschemenge können im Betrieb Partikel mitgerissen werden, welche dann als Flugasche im Abgasstrom enthalten sind und so den Staubgehalt erhöhen.

**Presshilfsmittel:** Hinsichtlich des Presshilfsmittels ist kein eindeutiger Zusammenhang zum Staubgehalt im Abgas feststellbar. Unter Berücksichtigung der Schwankungsbreiten und der Messunsicherheiten können keine Zusammenhänge zwischen Brennstoff und Staubgehalt bei beiden Anlagen hergestellt werden.

**Stückigkeit:** Bei Erhöhung des Feinanteils durch Zerkleinerung der Pellets steigt der Staubgehalt in beiden Anlagen leicht an. Dieser Effekt scheint unabhängig vom Presshilfsmittel zu sein.

### Fazit:

*Die Staubemissionen bei der Verbrennung der Pellets scheinen weitgehend unabhängig vom Presshilfsmiteleinsatz zu sein. Wesentlich größeren Einfluss könnte die Feuerungstechnik besitzen. Im Vergleich mit der Abwurfffeuerung weist die Unterschubfeuerung höhere Staubgehalte auf. Hier könnte die größere Aschemenge, die auf dem Brennteller lagert, zu einem erhöhten Flugaschegehalt im Abgas führen und so den Staubgehalt erhöhen. Ein erhöhter Feinanteil im Brennstoff bewirkt bei beiden Anlagen auch einen erhöhten Staubgehalt im Abgas. Hier ist zu vermuten, dass der höhere Feinanteil zu einem erhöhten Flugaschegehalt führt. Beide Anlagen halten den Grenzwert der 1.BImSchV für Kleinfeuerungsanlagen von  $150 \text{ mg/Nm}^3$  ein.*

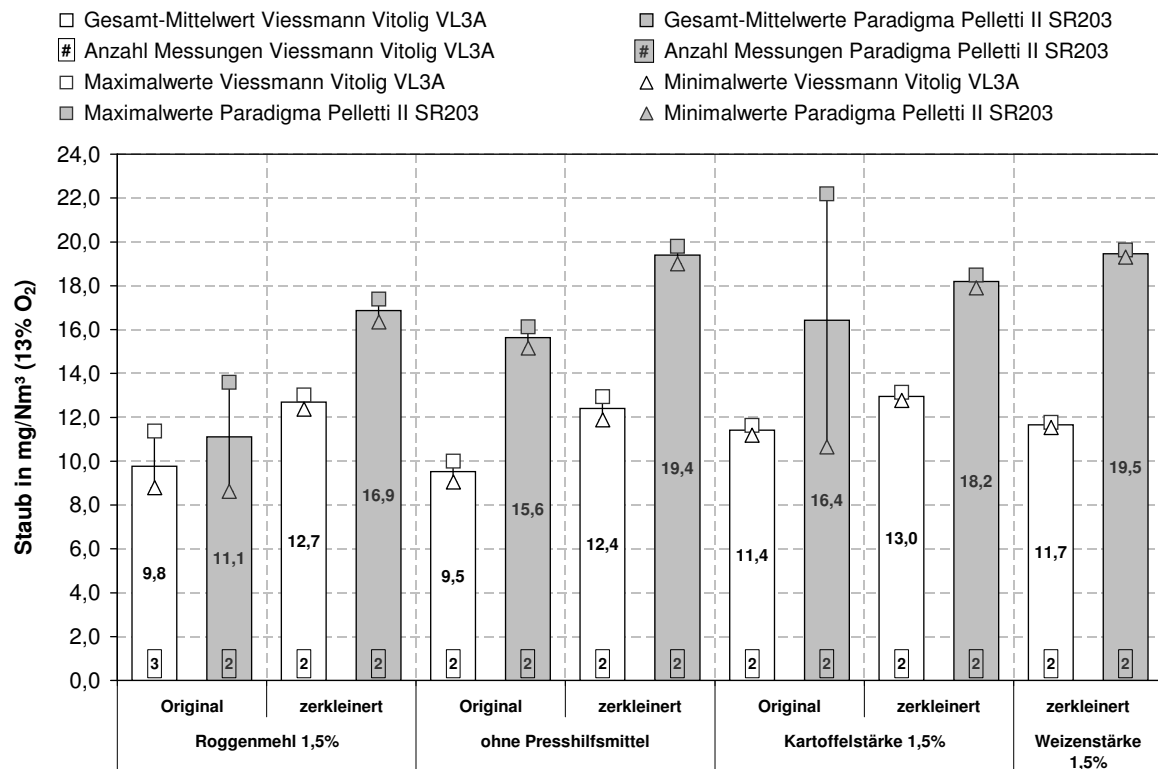


Abbildung 4.8: mittlerer Staubgehalt ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$  bei 13 % Sauerstoff) im Abgas in Abhängigkeit vom Brennstoff

## 4.5 Ascheerweichung

Zur Bewertung des Erweichungsverhaltens der Asche während der Technikumsversuche erfolgte nach jedem Verbrennungsversuch eine optische Untersuchung der Asche sowie während der Versuche die Messung der Temperatur im Glutbett. Während des Betriebes zeigten sich bei beiden Anlagen nur geringe Ansätze von Erweichung der Asche (Pelletti: Abbildung 4.9; VL3A: Abbildung 4.10). Diese leichten Zusammenbackungen der Asche besaßen allerdings eine so geringe Festigkeit, dass sie schon beim Herunterfallen vom Brennerteller bzw. aus der Brennerschale ihre Form verloren.

Als eine wesentliche Kenngröße für das Ascheerweichungsverhalten wird im folgenden die Glutbetttemperatur näher analysiert. In Tabelle 4.1 sind die Mittelwerte  $\bar{\vartheta}_{GB}$  sowie die Maximal-  $\vartheta_{GB,max}$  und Minimalwerte  $\vartheta_{GB,min}$  der gemessenen Glutbetttemperaturen beim VL3A und Pelletti, jeweils in Abhängigkeit vom Brennstoff, zusammengefasst.



(a) Aschepartikel vom Brennteller



(b) Bereich um den Temperatursensor auf dem Brennteller

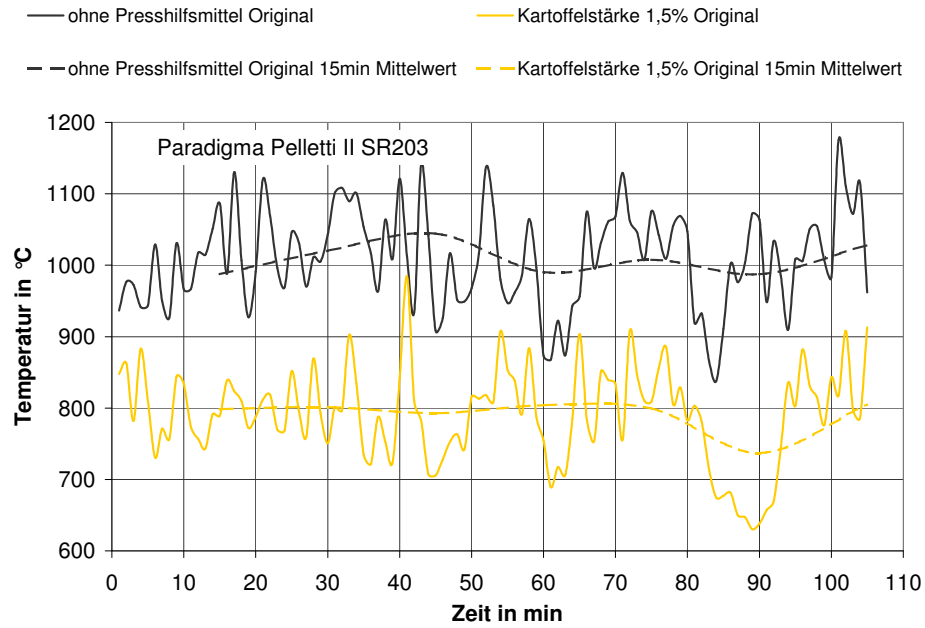
**Abbildung 4.9:** *Leichte Aschezusammenbackungen auf dem Brennteller des Paradigma Pelletti II SR203 nach Betrieb für  $\approx 24$ h mit Holzpellets ohne Presshilfsmittel*



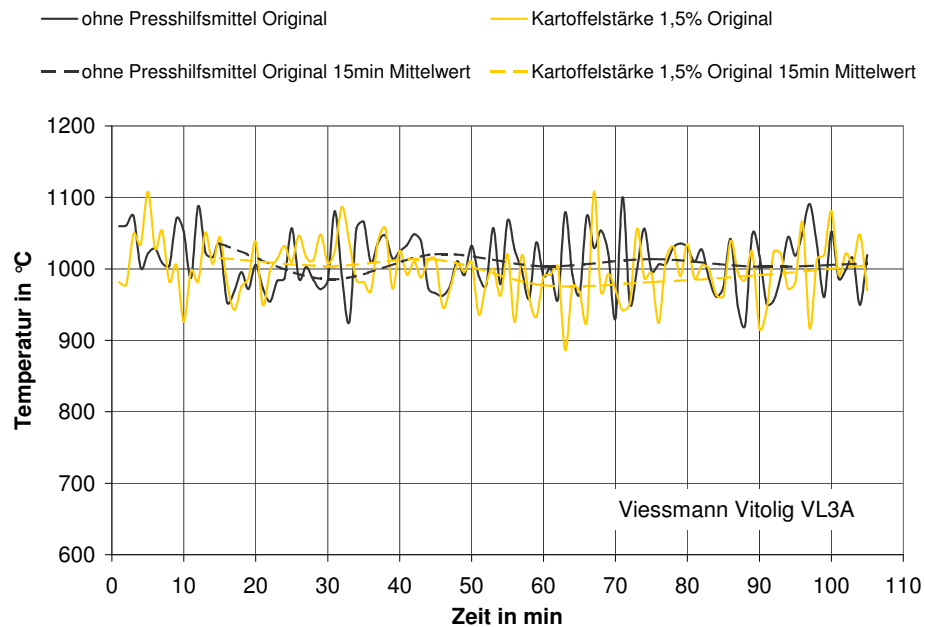
**Abbildung 4.10:** *Spuren zusammenhaftender Aschepartikel in der Brennerschale des Viessmann Vitolig VL3A nach Betrieb für ca. 24h mit zerkleinerten Holzpellets mit Weizenstärke.*

Beispielhaft für die Temperaturverläufe sind diese in Abbildung 4.12 für den VL3A und in Abbildung 4.11 für den Pelletti für Holzpellets ohne Presshilfsmittel und mit Kartoffelstärke dargestellt. Beide Anlagen weisen starke Schwankungen der Glutbetttemperatur auf. Dies könnte Ursache des diskontinuierlichen Betriebs der Brennstoffförderschnecken mit Betriebs- und Pausenzeiten sein. Im Anhang G, Abschnitt G.2 sind die Temperaturprofile aller weiteren untersuchten Holzpellets jeweils im Vergleich

mit den zerkleinerten Pellets zu finden.



**Abbildung 4.11:** *Glutbetttemperatur (in °C) des Paradigma Pelletti II SR203 bei Betrieb mit Holzpellets ohne Presshilfsmittel und mit Kartoffelstärke*



**Abbildung 4.12:** *Glutbetttemperatur (in °C) des Viessmann Vitotig VL3A bei Betrieb mit Holzpellets ohne Presshilfsmittel und mit Kartoffelstärke*

**Feuerungsprinzip:** Die Glutbetttemperatur im Pelletti unterliegt größeren Schwankungen als die des VL3A (Abbildungen 4.11 und 4.12). Vermutlich findet bei Brennstoffzugabe in die Brennerschale des VL3A eine Verschiebung der Glutzone nur in vertikaler Richtung statt, da der Glutbereich um die Primärluftöffnung relativ schmal ist (siehe Abbildung 3.4b). Hingegen kann beim Unterschubsystem durch eine verminderte Förderrate eine Verschiebung des Glutbereiches auf dem Brennteller in horizontaler Richtung erfolgen, wodurch Änderungen in der Förderrate eher an Temperaturänderungen erkennbar wären. Maximal werden in beiden Anlagen ca. 1100 °C erreicht, was erheblich unter der Erweichungstemperatur der Asche der Pellets von ca. 1350 °C liegt.

**Presshilfsmittel:** In der Brennerschale des VL3A werden, mit Ausnahme der Pellets mit Roggenmehl, relativ konstante Werte von ca. 1000 °C erreicht. Die bei den festen Pellets mit Roggenmehl bzw. Kartoffelstärke verringerte Förderrate und der damit verbundene höhere Luftüberschuss scheinen in erster Linie die Glutbetttemperatur beim Unterschubsystem zu beeinflussen. Dort kann eine Abnahme um ca. 100 K bei Pellets mit PHM festgestellt werden. Aufgrund der geringen Breite der Glutzone in der Brennerschale des VL3A und der Positionierung des Temperaturfühlers nah am Boden der Brennerschale, wird eine eventuelle Temperaturänderung durch eine verminderte Förderrate beim Einsatz von Pellets mit PHM vermutlich nicht erfasst, da im Sensorbereich immer Brennstoff umgesetzt wird. Beim Unterschubsystem hingegen kann eine verminderte Brennstoffförderrate zu einer geringeren Ausdehnung des Glutbettes auf dem Brennteller führen, was vom Temperaturfühler registriert werden kann. Bei den Versuchen konnte keine erhöhte Ascheerweichung durch Verwendung von Pellets mit PHM festgestellt werden. Ein Einfluss auf die Erweichungstemperatur der Asche durch die chemische Zusammensetzung der PHM erscheint aufgrund der geringen Anteile unrealistisch. Vielmehr scheint das PHM über seine Wirkung auf die Pelletfestigkeit und damit den Abrieb und den Feinanteil sowie die Förderrate die erreichbaren Temperaturen im Glutbett zu beeinflussen.

**Stückigkeit:** Der höhere Feinanteil bei zerkleinerten Pellets bewirkt vor allem im Pelletti eine Erhöhung der mittleren Temperatur um rund 150 K, was Ursache der erhöhten Förderrate bei zerkleinerten Pellets sein kann. Hier scheint ebenfalls der Effekt, der veränderten Ausdehnung der Glutzonen bei veränderter Förderate (VL3A eher vertikal; Pelletti eher horizontal), aufzutreten. Die beobachteten Zusammenhaftungen einzelner Aschepartikel traten alle bei zerkleinerten Pellets auf, der Feinanteil scheint einen wesentlich größeren Einfluss auf die Ascheerweichungsneigung als die chemische Zusammensetzung des PHM zu besitzen.

Allerdings ist der Feinanteil abhängig von der Pelletfestigkeit und damit vom Presshilfsmittel.

### Fazit:

*Ursache für die Ascheerweichung kann zum einen eine niedrige Ascheschmelztemperatur, zum anderen eine hohe Feuerraumtemperatur sein. Eine Annahme über das Auftreten von Ascheerweichungen bei Holzpellets bestand bisher darin, dass die PHM-Zugabe den Erweichungspunkt senkt, da einige PHM hohe Alkaliengehalte aufweisen, die die Erweichungstemperatur senken können (z.B. Na oder Si). Dieser Zusammenhang bestätigte sich im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht. Vielmehr scheint der für die Herstellung verwendete Rohstoff maßgeblichen Einfluss auf die Ascheerweichungstemperatur zu besitzen, da über den Rohstoff auch entsprechende Alkalienmengen (z.B. durch Verwendung von Rinde oder Holz von sandigen Böden) in die Pellets gelangen können, so dass deren Ascheerweichungstemperatur in den Bereich der Feuerraumtemperatur gelangt. Vielmehr bewirkt die PHM-Zugabe eine Veränderung der Pelletfestigkeit und des Feinanteiles sowie der Brennstoffförderate, was Einfluss auf die im Brennraum erreichbaren Temperaturen haben kann. So scheint ein hoher Feinanteil zu höheren Temperaturen zu führen, während die verringerte Förderate zu geringeren Temperaturen führen kann.*

*Grundsätzlich sollten auftretende Ascheerweichungen bei Unterschubfeuerung (Pelletti) weniger Probleme bereiten als bei einer Brennerschale (VL3A), da diese durch den mittig nachrückenden Brennstoff in den Aschekasten geschoben werden können. Dagegen ist es beim VL3A vorstellbar, dass es beim Auftreten von Ascheerweichung zu einem Verschluss der Öffnungen des Rostes und der Primärluftzuführung kommen kann, wodurch kein weiterer Auscheastrag aus der Brennerschale möglich wäre, was bis zum Anlagenstillstand führen kann.*

**Tabelle 4.1:** Maximal-  $\vartheta_{GB,max}$ , Minimal-  $\vartheta_{GB,min}$  und mittlere Glutbetttemperaturen  $\bar{\vartheta}_{GB}$  des Viessmann Vitolig VL3A und des Paradigma Pelletti II SR203 in Abhängigkeit vom Presshilfsmittel und der Brennstoffstückigkeit im Vergleich mit den Analysewerten für das Ascheschmelzverhalten der RWTH Aachen

Holzpellets	Viessmann Vitolig VL3A			Paradigma Pelletti II SR203			Ascheschmelzverhalten (RWTH Aachen)			
	$\bar{\vartheta}_{GB}$	$\vartheta_{GB,max}$	$\vartheta_{GB,min}$	$\bar{\vartheta}_{GB}$	$\vartheta_{GB,max}$	$\vartheta_{GB,min}$	$\vartheta_{EP}$	$\vartheta_{SP}$	$\vartheta_{HK}$	$\vartheta_{FP}$
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
ohne Presshilfsmittel	1001	1100	828	1009	1175	838	1340	1400	1430	1480
ohne Presshilfsmittel zerkleinert	1034	1099	907	978	1163	730				
mit 1,5 % Kartoffelstärke	999	1108	885	795	985	630	1340	1490	1530	1570
mit 1,5 % Kartoffelstärke zerkleinert	1016	1115	900	944	1104	734				
mit 1,5 % Roggenmehl	837	1000	736	895	1092	613	1380	1430	1550	1570
mit 1,5 % Roggenmehl zerkleinert	912	1084	774	1018	1025	847				
mit 1,5 % Weizenstärke	967	1013	893	897	945	819	1460	1520	1560	1600
mit 1,5 % Weizenstärke zerkleinert										



## 4.6 Abgasverlust und feuerungstechnischer Wirkungsgrad

Um die Effekte von Presshilfsmitteln, Pelletqualität und Feuerungssystem auf die feuerungstechnische Effizienz des Kessels einschätzen zu können, wurde für die verwendeten Brennstoffe der Energieverlust durch im Abgas enthaltene Wärme (Abgasverlust) berechnet. Die Berechnung erfolgte über die im Anhang D, Abschnitt D.5, aufgeführten Gleichungen unter Einbeziehung von

- Elementarzusammensetzung des Brennstoffes,
- Sauerstoffgehalt im Abgas (Luftüberschuss),
- Abgastemperatur und
- Verbrennungslufttemperatur.

Die für die Berechnung notwendigen Zwischengrößen und Koeffizienten, die sich aus der Elementaranalyse (siehe Tabelle F.1) ergeben, sind im Anhang D.5 in Tabelle D.4 zusammengefasst. Die so ermittelten mittleren Abgasverluste sind in Abbildung 4.13 in Abhängigkeit vom Brennstoff gegenübergestellt. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad  $\eta_F$  ergibt sich direkt aus dem Abgasverlust  $q_A$  (Gleichung 4.1). Verluste durch unverbrannte Bestandteile im Abgas (z.B. CO) wurden aufgrund des CO-Anteils  $< 0,05\%$ <sup>1</sup> vernachlässigt.

$$\eta_F = 100\% - q_A \quad (4.1)$$

**Feuerungsprinzip:** Hinsichtlich des Abgasverlustes ist zwischen den Feuerungssystemen kein eindeutiger Unterschied feststellbar. Maximal werden beim Unterschubsystem (Pelletti) 15,0 %, bei der Abwurffeurung (VL3A) 17,1 % Abgasverlust erreicht.

**Presshilfsmittel:** Wie beim Luftüberschuss weisen die sehr festen Pellets mit Roggenmehl bzw. Kartoffelstärke die höchsten Abgasverlustwerte auf. So erhöhen sich die Verluste im Vergleich zu unzerkleinerten Pellets ohne Presshilfsmittel beim VL3A um rund 6 % bei Pellets mit Roggenmehl und Kartoffelstärke. Beim Pelletti lässt sich eine Erhöhung des Abgasverlustes durch Einsatz von Kartoffelstärke und Roggenmehl um rund 2 %, im Vergleich zu Pellets ohne PHM, feststellen.

---

<sup>1</sup>0,05 % CO = 500 ppm = 625 mg/Nm<sup>3</sup>

Wie beim Luftüberschuss weisen die Pellets ohne PHM mit 10,9 % (VL3A) bzw. 13,5 % Abgasverlust die niedrigsten Werte auf. Damit werden im günstigsten Fall Werte erreicht, die um rund 6 % (VL3A) bzw. 5 % (Pelletti) unter den jeweiligen Herstellerangaben für den Kesselwirkungsgrad liegen. Ursache für diese hohen Verluste scheint der erhöhte Luftüberschuss, ausgelöst durch die verminderte Förderrate bei den festen Pellets mit PHM zu sein.

**Stückigkeit:** Die Zerkleinerung der Pellets erhöht den Feinanteil und damit die Förderrate. Dadurch sinkt der Luftüberschuss, was auch an den Abgasverlustwerten erkennbar ist. Ausnahme sind wiederum die Pellets ohne PHM, bei ihnen steigt durch Zerkleinerung sowohl Luftüberschuss als auch Abgasverlust an. Damit stellen sie hinsichtlich der Stückigkeit die untere Grenze für geringen Luftüberschuss und Abgasverlust dar. Bei Zerkleinerung der Pellets ohne PHM liegen die Brennstoffpartikel vermutlich so dicht zusammen, dass nicht mehr ausreichend Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung an den Brennstoff gelangen kann, wodurch der Brennstoff nicht mehr komplett umgesetzt wird und der Abgasverlust ansteigt.

### Fazit:

*Durch PHM-Zugabe erhöht sich die Festigkeit der Holzpellets. Damit sinkt die Brennstoffförderrate und es kommt aufgrund fehlender Regelung der Verbrennungsluft über einen Sauerstoffsensoren in beiden Anlagen zu einem erhöhten Luftüberschuss. Dieser führt zu höheren Abgasverlusten beim Einsatz von Pellets mit PHM. Im günstigsten Fall (Pellets ohne PHM) ergeben sich feuerungstechnische Wirkungsgrade von rund 89 % (VL3A) bzw. 87 % (Pelletti), im ungünstigsten Fall (Pellets mit Kartoffelstärke) rund 83 % (VL3A) bzw. 85 % (Pelletti). Diese Werte liegen erheblich niedriger, als die Herstellerangaben für den Kesselwirkungsgrad (95 % beim VL3A [Viessmann, 2006] und 92,6 % beim Pelletti [Paradigma, 2007]).*

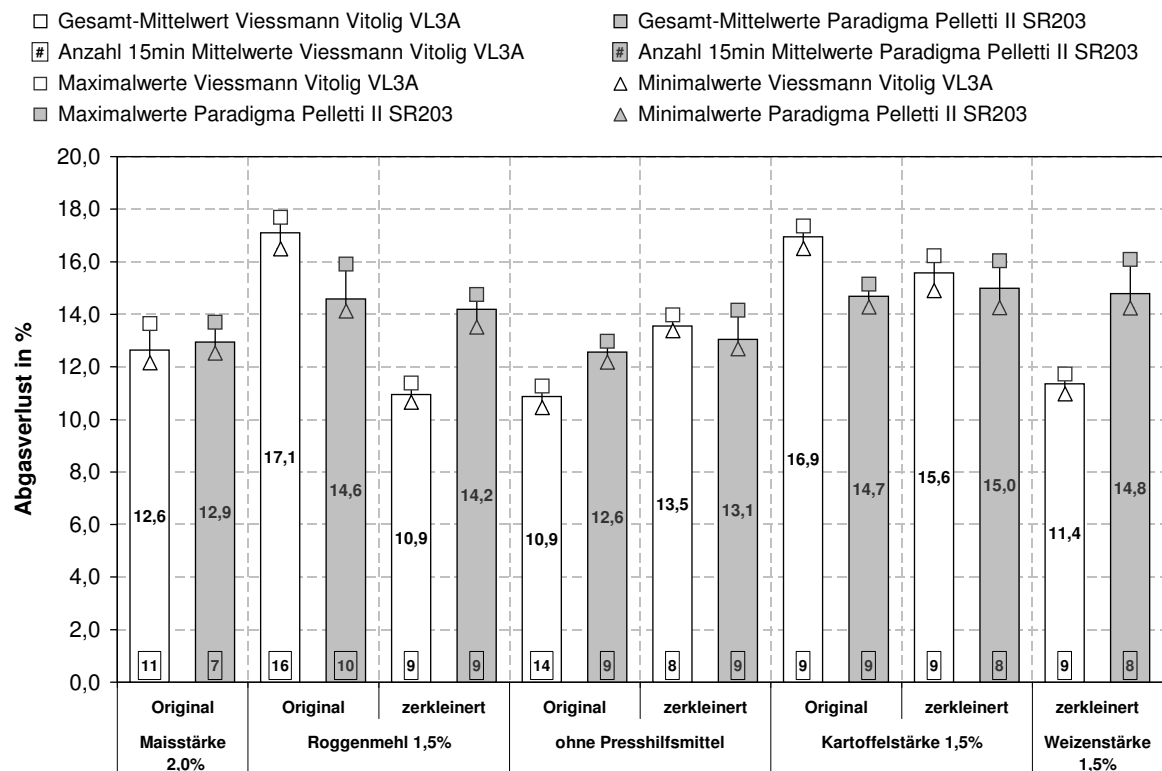


Abbildung 4.13: mittlere Abgasverluste (in %) in Abhängigkeit vom Brennstoff

# 5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die thermische Nutzung von Holzpellets in Kleinfeuerungsanlagen in Deutschland steigt kontinuierlich an, so dass sowohl die installierte Anlagenzahl als auch die produzierten Mengen jährlich zunehmen. Um bei der Herstellung der Holzpellets den Energieaufwand zu minimieren und gleichzeitig die Qualitätsanforderungen der DINplus zu erfüllen, werden häufig Presshilfsmittel beim Pelletieren eingesetzt, bisher vor allem Mais- und Weizenstärke. Um flexibler auf veränderte Markt- und Rohstoffbedingungen reagieren zu können, besteht von Seiten der Hersteller Bedarf an alternativen Presshilfsmitteln. Allerdings ist deren Einfluss auf das Verbrennungs-, Emissions- und Ascheerweichungsverhalten nur unzureichend erforscht. Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Optimierung der Pelletproduktion wurden in dieser Diplomarbeit Versuche durchgeführt, um den Einfluss verschiedener natürlicher Presshilfsmittel, der Pelletqualität (Feinanteil, Stückigkeit) und der Feuerungsart (Unterschub- und Abwurffeurung mit Brennerschale) auf das Emissionsverhalten (Kohlenmonoxid-, Stickoxid-, Gesamtkohlenstoff- und Staubgehalt im Abgas), den Anlagenbetrieb (Brennstoffförderraten, Abgasverluste, Luftüberschuss) und das Ascheerweichungsverhalten beim Betrieb von zwei Kleinfeuerungsanlagen mit DINplus-konformen Holzpellets, zu untersuchen.

Pelletchargen mit PHM weisen einen höheren Anteil längerer und festerer Pellets auf und führen zu einer verringerten Brennstoffförderrate in den untersuchten Anlagen, da die zum Transport eingesetzten Förderschnecken eine relativ geringe Bauhöhe aufweisen und dadurch auch die Gewindegänge entsprechend eng sind. Liegen mehr längere Pellets vor, müssen diese erst vom Fördersystem zerkleinert werden, um zwischen die Gewindegänge zu rutschen und weiter transportiert zu werden. Da die Regelung beider Anlagen nur der Leistungsanpassung und nicht der Steuerung des Verbrennungsprozesses dient, werden die Taktungszeiten der Förderschnecke im Vollastbetrieb nicht verändert. Dies führt bei geringerer Förderrate der Holzpellets zu einem geringeren Brennstoffmassenstrom in den Feuerraum. Da die Verbrennungsluftzufuhr im Vollastbetrieb konstant

bleibt (keine Regelung über einen Sauerstoffsensor), kann so ein zu hoher Luftüberschuss im Feuerraum auftreten, der den Verbrennungsprozess negativ beeinflussen kann und zu erhöhtem Schadstoffausstoß und höheren Abgasverlusten führt.

Der Einsatz von Pellets mit PHM führt zu erhöhten CO- und TOC-Emissionen. Dieser Effekt war bei der Anlage mit Abwurfheizung (Brennerschale) stärker zu beobachten als bei der Unterschubheizung. Ursache hierfür ist vermutlich der erhöhte Luftüberschuss, ausgelöst durch die verminderte Brennstoffförderate. Ein erhöhter Feinanteil (z.B. durch lange Transportwege) kann die Förderate bei Pellets mit PHM erhöhen und so den Luftüberschuss und damit die Schadstoffbildung und den Abgasverlust verringern. Ein zu hoher Feinanteil bewirkt allerdings den gegenteiligen Effekt. Ursache dafür könnte die unzureichende Sauerstoffversorgung der einzelnen Brennstoffpartikel sein. Dies führt dann zu einer unvollkommenen Verbrennung, höherem Luftüberschuss, höheren Abgasverlusten und höheren Emissionen. Die Pellets ohne PHM stellen im Rahmen dieser Versuche die untere Grenze für die Stückigkeit bzw. den Feinanteil dar, da sich bei deren Zerkleinerung die Luftüberschuss-, Emissions- und Abgasverlustwerte verschlechtern. Im Vergleich mit dem gesetzlichen Grenzwert von  $4.000 \text{ mg/Nm}^3$  CO für Kleinfeuerungsanlagen (1.BImSchV) relativieren sich die festgestellten Effekte, da sich alle Änderungen der CO-Emissionen im Bereich unter  $500 \text{ mg/Nm}^3$  abspielen.

Die Stickoxidemissionen sind in beiden Anlagen relativ konstant und ändern sich nur gering bei den verschiedenen Pellets oder deren Stückigkeit. Die Stickoxide scheinen hauptsächlich aus dem im Brennstoff enthaltenen Stickstoff zu stammen, da die für die thermische Stickoxidbildung notwendigen hohen Temperaturen im Feuerraum nicht erreicht wurden (gemessene Temperaturen  $< 1200^\circ\text{C}$ ). Da die Stickstoffgehalte im Holzrohmaterial der Pellets relativ gering (max. 0,05 %) und konstant bei allen Chargen sind, konnte dieses stabile  $\text{NO}_x$ -Niveau erwartet werden.

Bei den durchgeführten Versuchen scheint die Feuerungstechnik Haupteinflussgröße auf den Staubgehalt im Abgas zu sein. So weist die Unterschubheizung bei allen Messungen einen höheren Staubgehalt als die Abwurfheizung auf. Ein höherer Feinanteil im Brennstoff (zerkleinerte Pellets) scheint zudem eine geringe Erhöhung des Staubgehaltes zu bewirken. Die Erhöhung des Staubgehaltes beim Unterschubsystem könnte mit dessen Aufbau zusammenhängen. Da dort die Asche auf dem Brennteller lagert, können Aschepartikel in den Abgasstrom gerissen werden, die dann einen erhöhten Staubgehalt zur Folge haben. Bei beiden Anlagen kann ein höherer Feinanteil dazu führen, dass mehr Partikel vom Abgas mitgerissen werden und dann als Flugasche den Staubgehalt im Abgas erhöhen. Beide Anlagen liegen mit maximalen Staubgehalten von  $13,0 \text{ mg/Nm}^3$  (VL3A mit zerkleinerten Holzpellets mit Kartoffelstärke) bzw.

19,5 mg/Nm<sup>3</sup> (Pelletti mit zerkleinerten Holzpellets mit Weizenstärke) erheblich unter dem Grenzwert der 1.BImSchV für Kleinf Feuerungsanlagen von 150 mg/Nm<sup>3</sup> (13 % Bezugssauerstoff).

Sowohl Abgasverluste als auch Luftüberschüsse beider Anlagen liegen im Vergleich mit Literatur- und Herstellerangaben sehr hoch. So weisen übliche Biomassefeuerungen einen Luftüberschuss von 1,4 bis 1,8 auf [Nussbaumer, 2001], wobei die untersuchten Anlagen im günstigsten Fall (Holzpellets ohne PHM) ein  $\lambda$  von 2,2 (Abwurf feuerung) bzw. von 2,4 erreichen (Unterschubsystem). Bei den hier untersuchten Anlagen ergaben sich maximal sogar Luftüberschusszahlen von 3,9 bei der Abwurf feuerung bzw. 3,1 beim Unterschubsystem bei Holzpellets mit Roggenmehl. Im günstigsten Fall (Pellets ohne PHM) ergaben sich feuerungstechnische Wirkungsgrade<sup>1</sup> von rund 89 % für die Abwurf feuerung und 87 % für das Unterschubsystem. Im Vergleich mit den Herstellerangaben für den Kesselwirkungsgrad<sup>2</sup> sind diese Werte um 5,9 % (Abwurf feuerung) bzw. um 5,2 % (Unterschubsystem) geringer. Bei der Verbrennung der Pellets mit PHM wurden noch geringere feuerungstechnische Wirkungsgrade erreicht.

In Hinsicht auf die Ascheerweichung konnten durch die Versuche neue Erkenntnisse gewonnen werden. Einflussgrößen für ein Erweichen der Asche sind die Erweichungstemperatur der Asche, die von der Aschezusammensetzung abhängt, und die Feuerraumtemperatur. Da in den Versuchen mit Holzpellets mit PHM keine Ascheerweichungen festgestellt wurden und die PHM-Mengen bei maximal 2 % lagen, erscheint ein Absenken der Ascheerweichungstemperatur durch eine veränderte Zusammensetzung der Asche bei Verwendung von PHM unwahrscheinlich. Eher möglich ist eine Beeinflussung der Aschezusammensetzung durch den verwendeten Rohstoff. Insbesondere die Verwendung von Rinde oder Holz von sandigen Böden könnte den Ascheerweichungspunkt senken, da diese Rohstoffe i.d.R. einen höheren Alkalienanteil (z.B. Si) aufweisen. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass ein erhöhter Feinanteil der Pellets zu höheren Temperatur im Glutbett führt. Der Einsatz von PHM erhöht die Pelletfestigkeit und senkt so den Abrieb und Feinanteil. Die PHM-Zugabe bewirkt also indirekt eine Beeinflussung der Feuerraumtemperatur und darüber auch ein eventuelles Erweichen der Asche. Zu beachten ist allerdings, dass eine höhere Festigkeit auch die Brennstoffförder rate verringert, was bei Anlagen ohne Sauerstoffregelung zur Beeinflussung des Verbrennungsprozesses und zu erhöhten Luftüberschüssen und Abgasverlusten führen kann. Durch weitere Untersuchungen mit verschiedenen Rohstoffqualitäten soll im weiteren Projektverlauf die Ursache für Probleme mit Ascheerweichungen bei Holzpellets

---

<sup>1</sup>berücksichtigt nur Verluste durch Abgaswärme:  $\eta_F = 100 \% - \text{Abgasverlust}$

<sup>2</sup>berücksichtigt Verluste durch Strahlung, Abgaswärme, Unverbranntes in Asche und Abgas

weiter eingegrenzt werden. Hinsichtlich der Anlagentechnik sollte die Unterschubfeuerung besser mit Brennstoffen mit einer niedrigen Ascheerweichungstemperatur zurecht kommen, da lokal auftretende erweichende Asche über den Brennerteller geschoben werden kann. Bei Erweichen von Asche in der Brennerschale der Abwurfffeuerung ist zu befürchten, dass es durch deren geringe Bauhöhe sehr schnell zu Funktionsstörungen bis zum Anlagenstillstand kommen kann.

Im Ergebnis zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass trotz Normierung von Holzpellets in Deutschland (DINplus) durchaus hohe Qualitätsunterschiede möglich sind, wodurch sich sowohl das Abbrand- als auch Emissionsverhalten von Kleinfeuerungsanlagen für Holzpellets verändert. Neben der Art und Menge des verwendeten Presshilfsmittels konnte im Rahmen dieser Diplomarbeit auch der Einfluss von Transport- und Umschlagvorgängen auf den Brennstoff nachgewiesen werden. Zudem wurden weitere Erkenntnisse über mögliche Ursachen für die Ascheerweichung bei Holzpellets gewonnen. Um eine optimale Nutzung von Holzpellets zu gewährleisten, ist ein abgestimmtes Qualitätsmanagement über die gesamte Herstellungs- und Nutzungskette notwendig. Dies umfasst die Rohmaterialbereitstellung, Pelletherstellung und den Transport sowie die Nutzung in der Feuerungsanlage beim Verbraucher. Hier sollte eine weitere Sensibilisierung aller beteiligten Partner – Pellethersteller und Feuerungsanlagenhersteller, Brennstoffhändler sowie Fachhandwerker und Verbraucher – erfolgen.

# A Literaturverzeichnis

- [BMU 2006] BMU: Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1.BImSchV). In: *Umweltrecht - Wichtige Gesetze und Verordnungen zum Schutz der Umwelt*. München : Beck-Texte im DTV-Verlag, 2006
- [Cormier u. a. 2006] CORMIER, Stephania ; LOMNICKI, Slawo ; BACKES, Wayne ; DELLINGER, Barry: Origin and Health Impacts of Emissions of Toxic By-Products and Fine Particles from Combustion and Thermal Treatment of Hazardous Wastes and Materials. In: *Environmental Health Perspectives* 114 (2006), Nr. 6
- [DIN 51730 1998] DIN 51730: *Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), 1998
- [DIN 51731 1996] DIN 51731: *Preßlinge aus naturbelassenem Holz - Anforderungen und Prüfung*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), 1996
- [DIN CEN/TS 15149-2:2006-04 2006] DIN CEN/TS 15149-2:2006-04: *Feste Bio-brennstoffe - Verfahren zur Bestimmung der Teilchengrößenverteilung - Teil 2: Rüttelsiebverfahren mit Sieb-Lochgrößen von 3,15 mm und darunter*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.), 2006
- [DINplus 2002] DINPLUS: *DINplus Zertifizierungsprogramm - Holzpellets zur Verwendung in Kleinfeuerungsstätten*. Berlin : DIN CERTCO - Gesellschaft zur Konformitätsbewertung, 2002
- [FNR 2005] FNR: *Leitfaden Bioenergie*. S. 79. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.(FNR), 2005
- [Hainisch 2003] HAINISCH, Andreas: *Ursachenanalyse der PM10-Immission in urbanen Gebieten am Beispiel der Stadt Berlin*, Fakultät III - Prozesswissenschaften - der Technischen Universität Berlin, Dissertation, 2003
- [Hartmann 2001] HARTMANN, Hans: *Grundlagen der Festbrennstoffnutzung*. In: *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren*. Berlin : Springer, 2001



- [Hartmann u. a. 2000] HARTMANN, Hans ; BÖHM, Thorsten ; MAIER, Leonhard: Naturbelassene biogene Festbrennstoffe - umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. In: *Materialien Nr. 154*. München : Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung (Hrsg.), 2000
- [Hartmann u. a. 2003a] HARTMANN, Hans ; THUNEKE, Klaus ; HÖLDRICH, Alexander ; ROSSMANN, Paul: *Handbuch Bioenergie Kleinanlagen*. S. 51–60. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2003
- [Hartmann u. a. 2003b] HARTMANN, Hans ; THUNEKE, Klaus ; HÖLDRICH, Alexander ; ROSSMANN, Paul: *Handbuch Bioenergie Kleinanlagen*. S. 11–14. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2003
- [Hartmann u. a. 2003c] HARTMANN, Hans ; THUNEKE, Klaus ; HÖLDRICH, Alexander ; ROSSMANN, Paul: *Handbuch Bioenergie Kleinanlagen*. Gülzow : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2003
- [Kneer 2006] KNEER, Reinhold: *Skript zur Vorlesung Feuerungstechnik*. Aachen : Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2006
- [Launhardt 2002] LAUNHARDT, Thomas: *Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen*, Technische Universität München, Dissertation, 2002
- [Möbius 2006] MÖBIUS, Uwe: *Ein Beitrag zur Optimierung der Pelletproduktion*. Leipzig, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur, Diplomarbeit, 2006
- [Nussbaumer 2001] NUSSBAUMER, Thomas: *Direkte thermische Umwandlung (Verbrennung)*. In: *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren*. Berlin : Springer, 2001
- [Nussbaumer 2002] NUSSBAUMER, Thomas: Holzenergie - Teil 2b Holzpellets und Pelletheizungen. In: *Baudoc (56)101*. Blauen : Schweizer Baudokumentation, 2002. – [http://www.verenum.ch/Publikationen/Baudoc/2b\\_Pellets\\_red.pdf](http://www.verenum.ch/Publikationen/Baudoc/2b_Pellets_red.pdf)
- [Nussbaumer und Kaltschmitt 2001] NUSSBAUMER, Thomas ; KALTSCHMITT, Martin: *Grundlagen der Festbrennstoffnutzung*. In: *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken, Verfahren*. Berlin : Springer, 2001
- [Oberberger 1997] OBERBERGER, Ingwald: Stand und Entwicklung der Verbrennungstechnik. In: *VDI-Bericht 1319 Thermische Biomassenutzung - Technik und Realisierung*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, 1997, S. 47–80

- [ÖNORM M 7135 2000] ÖNORM M 7135: *Presslinge aus naturbelassenem Holz und naturbelassener Rinde - Pellets und Briketts, Anforderungen und Prüfbestimmungen*. Wien : Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg), 2000
- [Paradigma 2007] PARADIGMA: *Produktinformation Paradigma Holzpellet-Systeme*. Karlsbad : Paradigma Energie- und Umwelttechnik GmbH & Co. KG, 2007
- [Pesch 2006] PESCH, Markus: *Luftreinhaltung - Teil 1 Entstehung der Luftschadstoffe*. Berlin : Skript zur Vorlesung Luftreinhaltung an der Technischen Universität Berlin, 2006
- [ProBas 2007] PROBAS: *Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme*. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/>, Zugriff am 16.03.2007 : Umweltbundesamt (UBA), 2007. – Abfrage für Holzpellets (Fabrik/Holz-Pellets-Holzwirtschaft-DE-2000)
- [Rommeiß 2004] ROMMEISS, Nicolas: *Verwendung von Bindemitteln in der Pelletproduktion - Einfluss auf die Qualität und Verbrennung von Holzpellets*. Berlin, Technische Universität Berlin, Diplomarbeit, 2004
- [Schlaug (Mann Naturenergie) u. a. 2006] SCHLAUG (MANN NATURENERGIE), Wolfgang ; AECKERSBERG (RWTH AACHEN), Roland ; WITT (IE LEIPZIG), Janet ; LEHMANN (IE LEIPZIG), Bastian ; BECHER (IE LEIPZIG), Nadja: *Projekttreffen Optimierung der Pelletproduktion am 31.07.2007 von Mann Naturenergie GmbH & Co. KG, Rheinisch-Westfälischer Technischer Hochschule Aachen und Institut für Energetik und Umwelt gGmbH*. Leipzig : Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Leipzig, 2006
- [Strauß 2006] STRAUSS, Karl: *Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen*. Berlin : Springer VDI Verlag, 2006
- [Thrän u. a. 2004] THRÄN, Daniela ; ELTROP, Ludger ; HÄRDTLEIN, Marlies: *Voraussetzungen zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe*. In: *Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe*. Münster : Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.(FNR), 2004
- [VDI-Richtlinie 2066 2006] VDI-RICHTLINIE 2066: *Blatt 1: Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbela-dung*. Berlin : VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft - Band 4: Analysen- und Messverfahren, 2006

- [Vetter 2001] VETTER, Armin: Qualitätsanforderungen an halmgutartige Bioenergieträger hinsichtlich der energetischen Verwertung. In: *Gülzower Fachgespräche Band 17 - Energetische Nutzung von Stroh, Ganzpflanzengetreide und weiterer halmgutartiger Biomasse*. Tautenheim : Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2001
- [Viessmann 2006] VIESSMANN: *Produktinformation Vitolog Festbrennstoffkessel Nenn-Wärmeleistungsbereich 2,9 - 40 kW*. Allendorf : Viessmann Werke GmbH & Co. KG, 2006
- [Weber 1998] WEBER, Harald: *Moderne Meß-, Steuer- und Regeltechnik für schadstoffarme Feuerungsanlagen*. Walldorf/Baden : LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co KG, 1998. – <http://www.lamtec.de/Datenblatt/ModerneMess.pdf>
- [Wirtgen u. a. 2006a] WIRTGEN, Christian ; AECKERSBERG, Roland ; LANGHEINRICH, Christian ; WITT, Janet ; DÖRING, Stefan ; WEIGANDT, Jörg: *2. Zwischenbericht Optimierung der Pelletproduktion - Identifizierung möglicher Presshilfsmittel*. S. 7–9. Aachen/Leipzig/Langenbach : Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen / Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Leipzig / Mann Naturenergie GmbH & Co. KG Langenbach, 2006
- [Wirtgen u. a. 2006b] WIRTGEN, Christian ; AECKERSBERG, Roland ; LANGHEINRICH, Christian ; WITT, Janet ; DÖRING, Stefan ; WEIGANDT, Jörg: *2. Zwischenbericht Optimierung der Pelletproduktion - Identifizierung möglicher Presshilfsmittel*. S. 9. Aachen/Leipzig/Langenbach : Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen / Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Leipzig / Mann Naturenergie GmbH & Co. KG Langenbach, 2006
- [Wirtgen u. a. 2006c] WIRTGEN, Christian ; AECKERSBERG, Roland ; LANGHEINRICH, Christian ; WITT, Janet ; DÖRING, Stefan ; WEIGANDT, Jörg: *Vorhabensbeschreibung Optimierung der Pelletproduktion - Entwicklung einer Einflussmatrix auf die Pelletqualität und das Abbrandverhalten*. S. 4. Aachen/Leipzig/Langenbach : Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen / Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Leipzig / Mann Naturenergie GmbH & Co. KG Langenbach, 2006
- [Witt 2006a] WITT, Janet: *Besichtigung der Pelletherstellung bei Mann Naturenergie GmbH & Co. KG Langenbach*. Leipzig/Langenbach : Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Leipzig, 2006
- [Witt 2006b] WITT, Janet: *Interne Korrespondenz mit Mann Naturenergie GmbH & Co. KG Langenbach*. 2006

- [Witt u. a. 2006] WITT, Janet ; BRÜCKNER, Antje ; LANGHEINRICH, Christian ; LINDNER, Klaus ; LENZ, Volker: *Regionale und überregionale Einsatzmöglichkeiten von Holzbrennstoffen - insbesondere Holzpellets* -. S. 60–78. Leipzig : Institut für Umwelt und Energetik Leipzig, 2006
- [Witt und Thrän 2005] WITT, Janet ; THRÄN, Daniela: Holzpellets - ein Markt mit Zukunftsperspektiven. In: *Holz-Zentralblatt* 131 (2005), Nr. 93, S. 1279
- [ZIV 1995] ZIV: *Vorgänge um die Verbrennung*. Essen : Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband (ZIV) - (Hrsg.), 1995
- [ZIV 1999] ZIV: *Taschenbuch des Schornsteinfegerhandwerks - Physikalisch-mathematische Grundlagen, Verbrennungstechnik, Immissionsschutz, Kenndaten von Feuerstätten, Schornsteinberechnung nach DIN 4705, Verbrennungsluftversorgung*. Essen : Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband (ZIV) - (Hrsg.), 1999

# B Qualitätsanforderungen an Holzpellets

**Tabelle B.1:** Qualitätsanforderungen an Holzpellets (I) nach ÖNORM M 7135 [2000], DIN 51731 [1996] und DINplus [2002]. (# = keine Anforderungen definiert)

Anforderung	DIN 51731		ÖNORM M 7135		DINplus
	Klasse		Klasse		
LÄNGE IN CM	HP1	> 30	HP1 Holzpellets	$\leq 5 \times D$	
	HP2	15-30	HP2	$\leq 4 \times D$	
	HP3	3-7	HP3 Holzbriketts	$\leq 40$	$\leq 5 \times D$
	HP4	< 10	RP1 Rindenpellets	$\leq 5 \times D$	
	HP5	< 5	RP2	$\leq 4 \times D$	
DURCHMESSER, BREITE, HÖHE IN CM			RP3 Rindenbriketts	$\leq 40$	
	HP1	> 10	HP1 Holzpellets	$0,4 \leq D < 1$	
	HP2	6-10	HP2	$0,4 \leq D < 1$	
	HP3	3-7	HP3 Holzbriketts	$4 \leq D < 12$	
	HP4	1-4	RP1 Rindenpellets	$0,4 \leq D < 1$	$0,4 \leq D < 1$
	HP5	0,4-1	RP2	$1 \leq D < 4$	
WASSERANTEIL IN %			RP3 Rindenbriketts	$4 \leq D < 12$	
	$\leq 12$		HP1 bis HP3	$\leq 10$	
			Holzpellets		$\leq 10$
			RP1 bis RP3	$\leq 18$	
ASCHEANTEIL (WF) IN %			Rindenpellets		
	$\leq 1,5$		HP1 bis HP3	$\leq 0,5$	
			Holzpellets		$\leq 0,5$
			RP1 bis RP3	$\leq 6$	
HEIZWERT $H_{u(wf)}$ IN kJ/kg			Rindenpellets		
	$\geq 17.500$			$\geq 18.500$	$\geq 18.000$
	$< 19.500$				

**Tabelle B.2:** Qualitätsanforderungen an Holzpellets (II) nach ÖNORM M 7135 [2000], DIN 51731 [1996] und DINplus [2002]. (# = keine Anforderungen definiert)

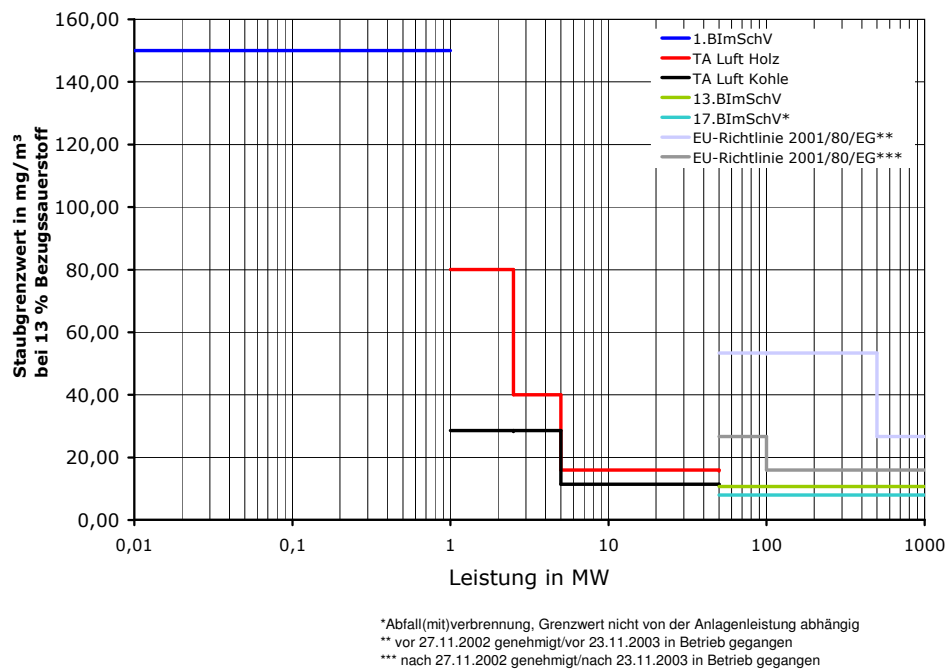
Anforderung	DIN 51731	ÖNORM M 7135	DINplus
SPURENSTOFFE (MAXIMALWERTE) IN %	S	0,08	HP1 bis HP3 $\leq 0,04$ RP1 bis RP 3 $\leq 0,08$ $\leq 0,04$
	Cl	0,03	HP1 bis HP3 $\leq 0,02$ RP1 bis RP3 $\leq 0,04$ $\leq 0,02$
	N	0,30	HP1 bis HP3 $\leq 0,30$ RP1 bis RP3 $\leq 0,60$ $\leq 0,30$
	As	0,80 mg/kg	#
	Cd	0,50 mg/kg	#
	Cr	8,00 mg/kg	#
	Cu	5,00 mg/kg	#
	Hg	0,05 mg/kg	#
	Pb	10,00 mg/kg	#
	Zn	100,00 mg/kg	#
	Org. geb.	3,00 mg/kg	#
	Halogene		
	ABRIEB	#	HP1 $\leq 2,3$ RP1 $\leq 2,3$ HP2/HP3 RP2/RP3 #
	PHM-GEHALT	#	$\leq 2,3$
	IN %		$\leq 2,0$

# C Übersicht über

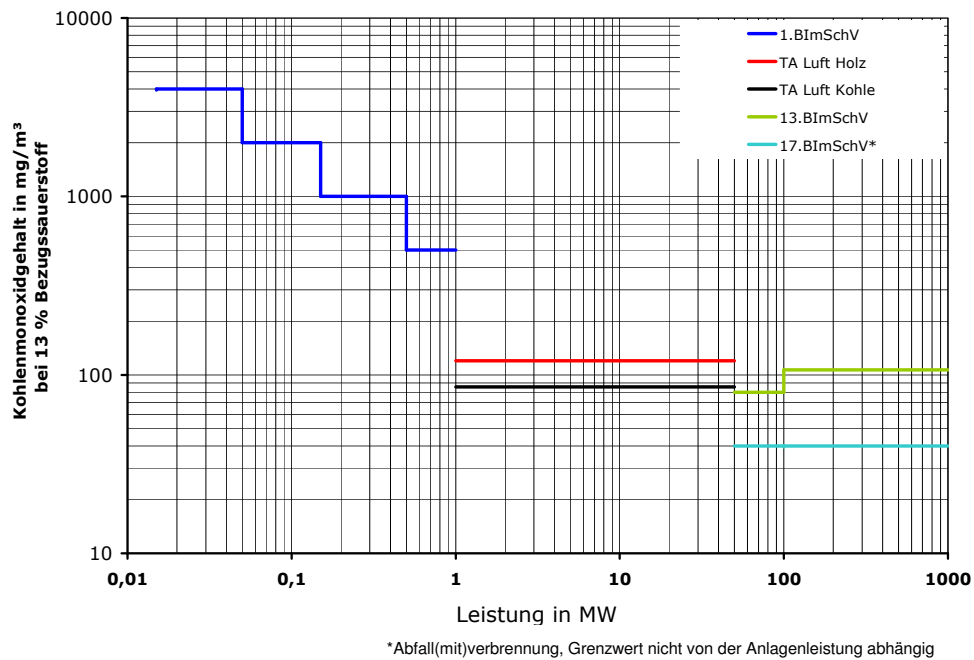
## Emissionsgrenzwerte

Die derzeitigen Verordnungen (1.BImSchV und TA-Luft) legen Grenzwerte für Feststofffeuerungsanlagen, teilweise in Abhängigkeit von der Leistung, fest. Wesentlich für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kleinf Feuerungsanlagen sind die Grenzwerte für Staub, Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxid(NO<sub>x</sub>). Da die Abgasmenge abhängig ist von der zugeführten Verbrennungsluftmenge werden die Emissionsgrenzwerte auf einen bestimmten Sauerstoffgehalt im Abgas bezogen. Dadurch ist die Vergleichbarkeit verschiedener Anlagen möglich.

Nachfolgend sind in den Abbildungen C.1, C.2, C.3 und C.4 die Staub-, Kohlenmonoxid, Stickoxid- sowie Schwefeldioxidgrenzwerte in Abhängigkeit der Anlagenleistung dargestellt. Zum Vergleich sind dort nicht nur die Grenzwerte der 1.BImSchV, sondern auch die Grenzwerte der TA Luft, der 13.BImSchV, 17.BImSchV und der EU-Rl 2001/80/EG eingetragen. Die Grenzwerte sind alle auf einen einheitlichen Bezugssauerstoff normiert.



Abbildungung C.1: Grenzwerte für Staub bei 13% Bezugssauerstoff in Abhängigkeit der thermischen Leistung der Feuerungsanlage



Abbildungung C.2: Grenzwerte für CO bei 13% Bezugssauerstoff in Abhängigkeit der thermischen Leistung der Feuerungsanlage



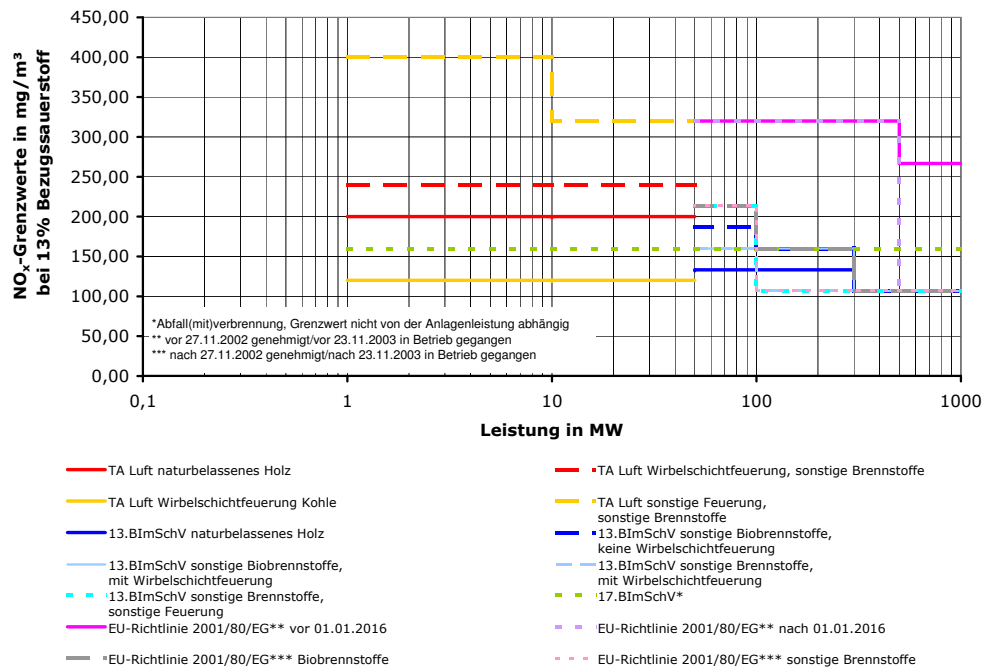


Abbildung C.3: Grenzwerte für NO<sub>x</sub> bei 13% Bezugssauerstoff in Abhängigkeit der thermischen Leistung der Feuerungsanlage

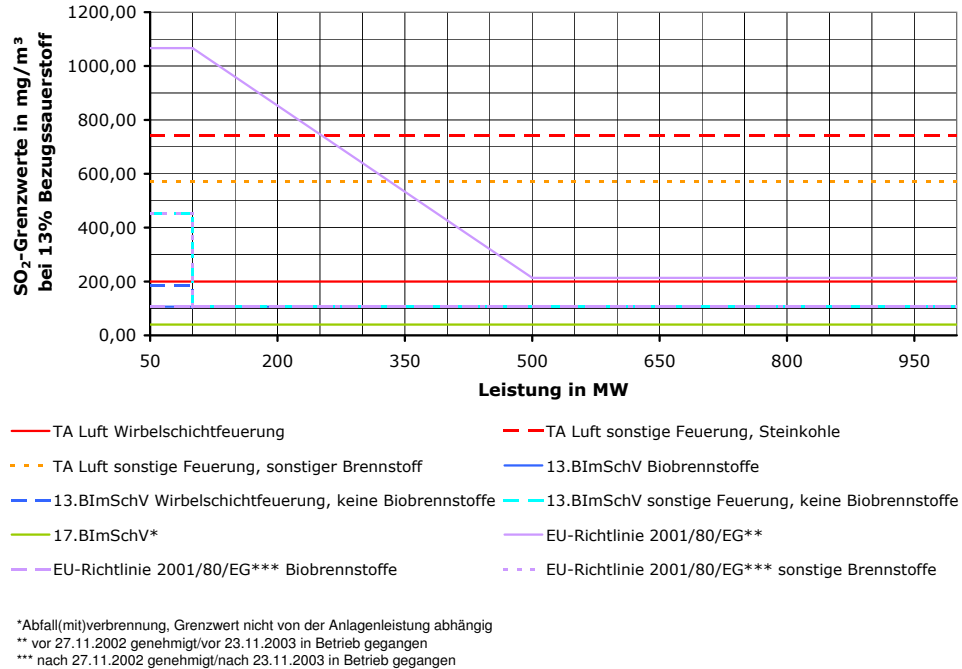


Abbildung C.4: Grenzwerte für SO<sub>2</sub> bei 13% Bezugssauerstoff in Abhängigkeit der thermischen Leistung der Feuerungsanlage

# D Verbrennungsrechnung

Mit Hilfe der Verbrennungsrechnung ermittelte Werte dienen der Auslegung und Bewertung der Feuerungs- und Abgasanlage und als Vergleichsbasis für Emissionsmesswerte. Nachfolgende Berechnungen entsprechen denen in ZIV [1995].

## D.1 Basis

Ausgangspunkt für die Berechnung ist die Elementaranalyse eines Brennstoffes. Aus ihr ist die Verteilung der Stoffanteile bekannt. Es gilt:

$$\mu_C : \text{Gehalt an Kohlenstoff in } \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bzw. Gew.}\% \quad (\text{D.1})$$

$$\mu_H : \text{Gehalt an Wasserstoff in } \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bzw. Gew.}\% \quad (\text{D.2})$$

$$\mu_S : \text{Gehalt an Schwefel in } \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bzw. Gew.}\% \quad (\text{D.3})$$

$$\mu_N : \text{Gehalt an Stickstoff in } \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bzw. Gew.}\% \quad (\text{D.4})$$

$$\mu_O : \text{Gehalt an Sauerstoff in } \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bzw. Gew.}\% \quad (\text{D.5})$$

$$\mu_W : \text{Gehalt an Wasser in } \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \text{ bzw. Gew.}\% \quad (\text{D.6})$$

Weiterhin werden die Zusammensetzung der Luft (Tabelle D.1) sowie die Molmassen und Molvolumina der bei der Verbrennung beteiligten Stoffe (Tabelle D.2) benötigt.

Allen weiteren Berechnung liegen die Reaktionsgleichungen für Kohlenstoff (D.7), Wasserstoff (D.9) und Schwefel (D.10) zugrunde.

**Tabelle D.1:** *Zusammensetzung der Luft nach [Strauß, 2006]*

Stickstoff	N <sub>2</sub>	78,11 Vol.-%
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	20,94 Vol.-%
Argon	Ar	0,916 Vol.-%
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	0,033 Vol.-%
Neon	Ne	0,002 Vol.-%
Rest	-	0,001 Vol.-%

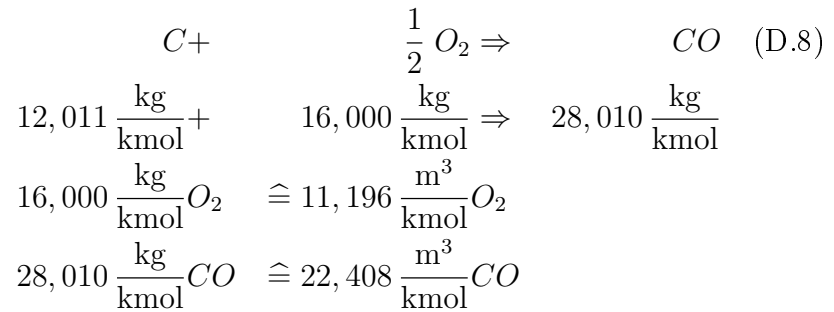
**Tabelle D.2:** *Molmassen und Molvolumina typischer Brennstoffbestandteile bezogen auf den Normzustand (101,3 kPa, 273,15 K) nach [Strauß, 2006]*

Stoff	Molmasse $M$	Molvolumina $V$
	in $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$	in $\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$
H <sub>2</sub>	2,016	22,428
C	12,011	-
S	32,060	-
N <sub>2</sub>	28,013	22,403
O <sub>2</sub>	31,999	22,392
CO	28,010	22,408
CO <sub>2</sub>	44,010	22,261
H <sub>2</sub> O <sub>(g)</sub>	18,015	22,410
SO <sub>2</sub>	64,060	22,856
Luft (trocken)	28,960	22,428

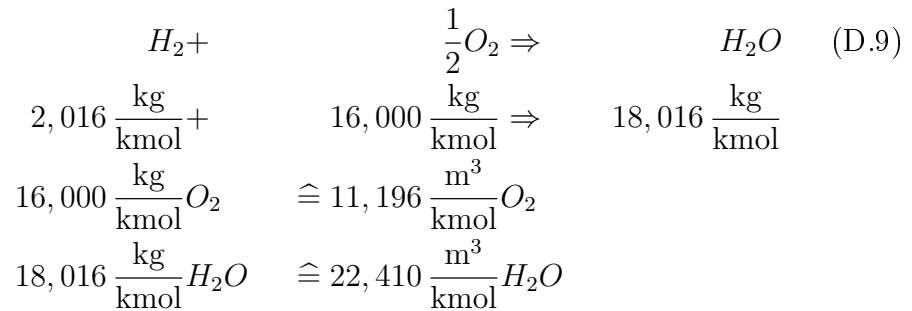
Verbrennung von Kohlenstoff zu CO<sub>2</sub>:

$$\begin{aligned}
 & C + O_2 \Rightarrow CO_2 \quad (\text{D.7}) \\
 & 12,011 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} + 31,999 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 44,010 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \\
 & 31,999 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} O_2 \hat{=} 22,392 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} O_2 \\
 & 44,010 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} CO_2 \hat{=} 22,261 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} CO_2
 \end{aligned}$$

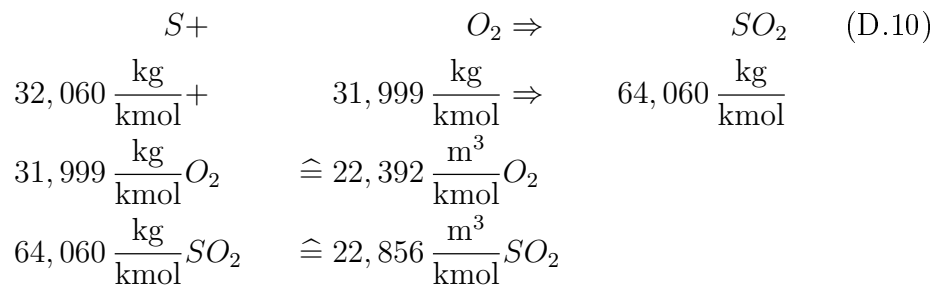
Verbrennung von Kohlenstoff zu CO:



Verbrennung von Wasserstoff:

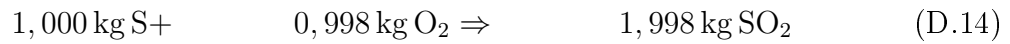
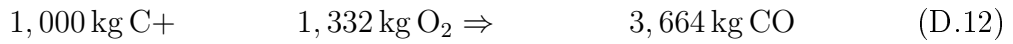
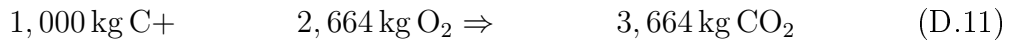


Verbrennung von Schwefel:

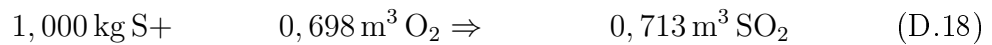
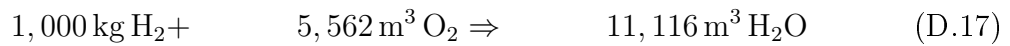


Damit ergeben sich der spezifische Sauerstoffbedarf und die spezifische Abgasmenge für die Komponenten Kohlenstoff, Wasserstoff und Schwefel (massebezogen Gleichung D.11, D.13, D.14; volumenbezogen Gleichung D.15, D.17, D.18).

massebezogen:



volumenbezogen:



## D.2 Sauerstoff- und Luftbedarf

Aus Tabelle D.2 ergibt sich für O<sub>2</sub> ein Volumen von  $0,700 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ <sup>1</sup>. Da Sauerstoff im Brennstoff die benötigte Sauerstoffmenge reduziert ergibt sich für den Gesamtsauerstoffbedarf:

$$V_{O_2,th} = 1,864 \cdot \mu_C + 5,562 \cdot \mu_H + 0,698 \cdot \mu_S - 0,700 \cdot \mu_O \quad (\text{D.19})$$

in m<sup>3</sup> Sauerstoff pro kg Brennstoff

Bei einer Zusammensetzung der Luft nach Tabelle D.1 ergibt sich Gleichung D.19 zu:

$$V_{L,th} = 8,902 \cdot \mu_C + 26,562 \cdot \mu_H + 3,333 \cdot \mu_S - 3,343 \cdot \mu_O \quad (\text{D.20})$$

in m<sup>3</sup> Luft pro kg Brennstoff

---

<sup>1</sup>  $\frac{22,392 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}}{31,999 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 0,700 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

Bei Betrieb mit Luftüberschuss erhöht sich die Verbrennungsluftmenge entsprechend. Es ergibt sich der praktische Luftbedarf  $V_{L,pr}$ :

$$V_{L,pr} = V_{L,th} \cdot \lambda \quad (D.21)$$

Der überschüssige Luftanteil  $V_{L,üb}$  ergibt sich zu

$$V_{L,üb} = V_{L,th} \cdot (\lambda - 1) \quad (D.22)$$

Ausgehend von Gleichung D.11 bis D.14 lassen sich die Massen entsprechend berechnen.

### D.3 Abgasmenge und Zusammensetzung

Aus den Gleichungen D.15 bis D.18 ergibt sich das  $\text{CO}_2$ -Volumen  $V_{\text{CO}_2}$ , das  $\text{CO}$ -Volumen  $V_{\text{CO}}$ , das Volumen des Wasserdampfes aus der Reaktion des im Brennstoff enthaltenen Wasserstoffes mit Sauerstoff  $V_{\text{H}_2,B}$  und das  $\text{SO}_2$ -Volumen  $V_{\text{SO}_2}$ :

$$V_{\text{CO}_2} = 1,853 \cdot \mu_C \quad \text{in } \frac{\text{m}^3 \text{ CO}_2}{\text{kg C}} \quad (D.23)$$

$$V_{\text{CO}} = 1,866 \cdot \mu_C \quad \text{in } \frac{\text{m}^3 \text{ CO}}{\text{kg C}} \quad (D.24)$$

$$V_{\text{H}_2,B} = 11,116 \cdot \mu_H \quad \text{in } \frac{\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O}}{\text{kg H}} \quad (D.25)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,713 \cdot \mu_S \quad \text{in } \frac{\text{m}^3 \text{ SO}_2}{\text{kg S}} \quad (D.26)$$

Allerdings muss noch der Stickstoffanteil, der im Mindestluftbedarf enthalten ist, und der Stickstoffanteil im Brennstoff berücksichtigt werden (Gleichung D.27 bis D.29).

Stickstoffanteil durch Mindestluftbedarf:

$$V_{\text{N}_2,L,th} = V_{L,th} - V_{\text{O}_2} \quad (D.27)$$

$$V_{\text{N}_2,L,th} = 7,038 \cdot \mu_C + 21,000 \cdot \mu_H + 2,635 \cdot \mu_S - 2,643 \cdot \mu_O \quad (D.28)$$

Stickstoffanteil im Brennstoff:

$$V_{N_2,B} = \mu_N \cdot 0,799 \quad (D.29)$$

Wasseranteil im Brennstoff:

$$V_{W,B} = \mu_W \cdot 1,245 \quad (D.30)$$

Der Gesamtgehalt an Wasserdampf im Abgas setzt sich aus dem Wassergehalt des Brennstoffes  $V_{W,B}$  und des durch die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff entstehenden Wassers  $V_{H_2,B}$  zusammen. Es gilt dann

$$V_{H_2O} = V_{W,B} + V_{H_2,B} \quad (D.31)$$

$$= \mu_W \cdot 1,245 + \mu_H \cdot 11,116 \quad (D.32)$$

Mit den Abgasteilvolumina aus Gleichung D.15 bis D.18 ergibt sich die theoretische, feuchte Abgasmenge  $V_{A,th,f}$  pro kg Brennstoff zu (Wassergehalt der Verbrennungsluft vernachlässigt):

$$\begin{aligned} V_{A,th,f} &= V_{CO_2} + V_{H_2,B} + V_{W,B} + V_{SO_2} + V_{N_2,L,th} + V_{N_2,B} \\ &= \underbrace{1,853 \cdot \mu_C}_{CO_2} + \underbrace{11,116 \cdot \mu_H}_{H_2 \text{ im Brennstoff}} + \underbrace{1,245 \cdot \mu_W}_{H_2O \text{ im Brennstoff}} + \underbrace{0,713 \cdot \mu_S}_{SO_2} + \\ &\quad \underbrace{(7,038 \cdot \mu_C + 21,000 \cdot \mu_H + 2,635 \cdot \mu_S - 2,643 \cdot \mu_O)}_{\text{Mindestluftbedarf-}N_2} + \\ &\quad \underbrace{0,799 \cdot \mu_N}_{\text{Brennstoff-}N_2} \end{aligned} \quad (D.33)$$

$$= 8,891 \cdot \mu_C + 32,116 \cdot \mu_H + 1,245 \cdot \mu_W + 3,348 \cdot \mu_S + 0,799 \cdot \mu_N - 2,643 \cdot \mu_O \quad (D.34)$$

Bei feuerungstechnischen Messungen zur Bestimmung des Wärmegehaltes im Abgas (Abgasverlust) wird die Abgasprobe durch Filter sowie Kondensatabscheider geleitet. Im Abgas enthaltener Wasserdampf kondensiert aus. Dadurch erfolgt die Bestimmung der Zusammensetzung im trockenen Abgas. Die trockene, theoretische Abgasmenge  $V_{A,th,tr}$  ergibt sich dann zu

$$V_{A,th,tr} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2,L,th} + V_{N_2,B} \quad (D.35)$$

$$= \underbrace{1,853 \cdot \mu_C}_{CO_2} + \underbrace{0,713 \cdot \mu_S}_{SO_2} + \underbrace{(7,038 \cdot \mu_C + 21,000 \cdot \mu_H + 2,635 \cdot \mu_S - 2,643 \cdot \mu_O)}_{\text{Mindestluft bedarf-}N_2} + \underbrace{0,799 \cdot \mu_N}_{\text{Brennstoff-}N_2} \quad (D.36)$$

$$= 8,891 \cdot \mu_C + 21,000 \cdot \mu_H + 3,348 \cdot \mu_S + 0,799 \cdot \mu_N - 2,643 \cdot \mu_O \quad (D.37)$$

Da Feuerungsanlagen zusätzlich noch mit Luftüberschuss betrieben werden, erhöht sich das theoretische, feuchte  $V_{A,th,f}$  bzw. trockene Abgasvolumen  $V_{A,th,tr}$  um den Luftüberschuss  $V_{L,\ddot{u}b}$ . Es ergibt sich das praktische, feuchte Abgasvolumen  $V_{A,pr,f}$  und das praktische, trockene Abgasvolumen  $V_{A,pr,tr}$ .

$$V_{A,pr,f} = V_{A,th,f} + V_{L,\ddot{u}b} \quad (D.38)$$

$$= V_{A,th,f} + (\lambda - 1) \cdot V_{L,th} \quad (D.39)$$

$$= 8,891 \cdot \mu_C + 32,116 \cdot \mu_H + 1,245 \cdot \mu_W + 3,348 \cdot \mu_S + 0,799 \cdot \mu_N - 2,643 \cdot \mu_O + (\lambda - 1) \cdot [8,902 \cdot \mu_C + 26,562 \cdot \mu_H + 3,333 \cdot \mu_S - 3,343 \cdot \mu_O] \quad (D.40)$$

Für das praktische, trockene Abgasvolumen ergibt sich somit:

$$V_{A,pr,tr} = V_{A,th,tr} + V_{L,\ddot{u}b} \quad (D.41)$$

$$= V_{A,th,tr} + (\lambda - 1) \cdot V_{L,th} \quad (D.42)$$

$$= 8,891 \cdot \mu_C + 21,000 \cdot \mu_H + 3,348 \cdot \mu_S + 0,799 \cdot \mu_N - 2,643 \cdot \mu_O + (\lambda - 1) \cdot [8,902 \cdot \mu_C + 26,562 \cdot \mu_H + 3,333 \cdot \mu_S - 3,343 \cdot \mu_O] \quad (D.43)$$

## D.4 Bestimmung des Luftüberschusses $\lambda$

Die praktische Feuerungsanlage wird in der Regel mit Luftüberschuss betrieben. Dadurch vergrößert sich das Abgasvolumen, die Volumina der Reaktionsprodukte des



Verbrennungsprozesse bleiben dabei konstant. Es ändert sich nur ihr prozentualer Anteil.

Beim Brennstoffkohlenstoff ist zu berücksichtigen, dass dieser sowohl zu  $\text{CO}_2$  als auch zu  $\text{CO}$  reagieren kann. Die Bildungsreaktion von  $\text{CO}$  tritt dann in Konkurrenz zur  $\text{CO}_2$ -Bildung. Die Summe beider Volumina muss aber, unabhängig vom Luftüberschuss, konstant sein, da die Ausgangsmenge Kohlenstoff, im Vergleich zum Betrieb ohne  $\text{CO}$ , gleich bleibt. Bildet sich statt  $\text{CO}_2$   $\text{CO}$ , ändert sich das Abgasvolumen nur unerheblich (Gleichung D.15 und D.16).

Soll also der  $\text{CO}_2$ -Anteil im Abgas als Maß für die Verdünnung der Abgase durch Luftüberschuss benutzt werden, muss die Summe aus  $\text{CO}_2$ -Anteil und  $\text{CO}$ -Anteil als Basis verwendet werden.

Für die Berechnung von  $\lambda$  wird als erstes der Idealfall mit  $\lambda = 1$  betrachtet, da dort keine Abgasverdünnung stattfindet. Der Volumenanteil von  $\text{CO}_2$  im Abgas  $\gamma_{\text{CO}_2,ideal}$  lässt sich dann ausdrücken als

$$\gamma_{\text{CO}_2,ideal} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{A,th,tr}} \quad (\text{D.44})$$

$$= \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2,L,th} + V_{\text{N}_2,B}} \quad (\text{D.45})$$

$$= \frac{1,853 \cdot \mu_C}{8,891 \cdot \mu_C + 21,000 \cdot \mu_H + 3,348 \cdot \mu_S + 0,799 \cdot \mu_N - 2,643 \cdot \mu_O} \quad (\text{D.46})$$

In der Literatur wird der ideale  $\text{CO}_2$ -Gehalt  $\gamma_{\text{CO}_2,ideal}$  auch als  $\text{CO}_{2\text{max}}$ -Wert bezeichnet. Die spezifischen  $\text{CO}_{2\text{max}}$ -Werte einiger Brennstoffe sind in Tabelle D.3 zusammengestellt.

Bei Betrieb mit Luftüberschuss wird das Abgas verdünnt, der prozentuale  $\text{CO}_2$ -Gehalt sinkt.

$$\gamma_{\text{CO}_2,real} = \frac{V_{\text{CO}_2,real}}{V_{A,pr,tr}} \quad (\text{D.47})$$

$$= \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{A,th,tr} + (\lambda - 1) \cdot V_{L,th}} \quad (\text{D.48})$$

mit Berücksichtigung von  $\text{CO}$  im Abgas (Abgasvolumen ändert sich **nicht**)

$$\gamma_{\text{CO}_2,real} + \gamma_{\text{CO},real} = \frac{V_{\text{CO}_2,real} + V_{\text{CO},real}}{V_{A,pr,tr}} \quad (\text{D.49})$$

Nun setzt man den idealen  $\text{CO}_2$ -Anteil  $\gamma_{\text{CO}_2,ideal}$  ins Verhältnis zur Summe aus  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CO}$ -Anteil im Abgas ( $\gamma_{\text{CO}_2,real} + \gamma_{\text{CO},real}$ ).

$$\frac{\gamma_{\text{CO}_2,ideal}}{\gamma_{\text{CO}_2,real} + \gamma_{\text{CO},real}} = \frac{\left( \frac{V_{\text{CO}_2,ideal}}{V_{A,th,tr}} \right)}{\left( \frac{V_{\text{CO}_2,real} + V_{\text{CO},real}}{V_{A,pr,tr}} \right)} \quad (\text{D.50})$$

Aufgrund des nahezu gleichen Molvolumens von  $\text{CO}$  bleibt das Abgasvolumen, welches aus der Verbrennung von Kohlenstoff entsteht, in der Summe konstant. Es verändern sich bei  $\text{CO}$ -Bildung nur die Volumenanteile  $V_{\text{CO}_2,real}$  und  $V_{\text{CO},real}$ . Insgesamt ergibt sich nahezu das gleiche Volumen, wie bei der Verbrennung des gesamten Kohlenstoffes zu  $\text{CO}_2$ . Damit gilt

$$V_{\text{CO}_2,real} + V_{\text{CO},real} = V_{\text{CO}_2,ideal} \quad (\text{D.51})$$

Somit lässt sich D.50 umformen zu

$$\frac{\gamma_{\text{CO}_2,ideal}}{\gamma_{\text{CO}_2,real} + \gamma_{\text{CO},real}} = \frac{\left( \frac{V_{\text{CO}_2,ideal}}{V_{A,th,tr}} \right)}{\left( \frac{V_{\text{CO}_2,ideal}}{V_{A,pr,tr}} \right)} \quad (\text{D.52})$$

$$= \frac{V_{A,pr,tr}}{V_{A,th,tr}} \quad (\text{D.53})$$

$$= \frac{V_{A,th,tr} + V_{L,\ddot{u}b}}{V_{A,th,tr}} \quad (\text{D.54})$$

$$= 1 + \frac{(\lambda - 1) \cdot V_{L,th}}{V_{A,th,tr}} \quad (\text{D.55})$$

nach  $\lambda$  aufgelöst:

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\gamma_{CO_2,ideal}}{\gamma_{CO_2,real} + \gamma_{CO_{real}}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{V_{A,th,tr}}{V_{L,th}} \right) \right] + 1 \quad (D.56)$$

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\gamma_{CO_2,ideal}}{\gamma_{CO_2,real} + \gamma_{CO_{real}}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2,L,th} + V_{N_2,B}}{V_{L,th}} \right) \right] + 1 \quad (D.57)$$

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\gamma_{CO_2,ideal}}{\gamma_{CO_2,real} + \gamma_{CO_{real}}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{8,891 \cdot \mu_C + 21,000 \cdot \mu_H + 3,348 \cdot \mu_S + 0,799 \cdot \mu_N - 2,643 \cdot \mu_O}{8,902 \cdot \mu_C + 26,562 \cdot \mu_H + 3,333 \cdot \mu_S - 3,343 \cdot \mu_O} \right) \right] + 1 \quad (D.58)$$

Der Ausdruck  $\left( \frac{V_{A,th,tr}}{V_{L,th}} \right)$  lässt sich nun zum brennstoffspezifischen Koeffizienten  $f_{B0}$  zusammenfassen. Es gilt dann:

$$f_{B0} = \left( \frac{V_{A,th,tr}}{V_{L,th}} \right) \quad (D.59)$$

$$= \left( \frac{8,891 \cdot \mu_C + 21,000 \cdot \mu_H + 3,348 \cdot \mu_S + 0,799 \cdot \mu_N - 2,643 \cdot \mu_O}{8,902 \cdot \mu_C + 26,562 \cdot \mu_H + 3,333 \cdot \mu_S - 3,343 \cdot \mu_O} \right) \quad (D.60)$$

Damit lässt sich Gleichung D.58 umformen zu

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\gamma_{CO_2,ideal}}{\gamma_{CO_2,real} + \gamma_{CO_{real}}} \cdot f_{B0} - f_{B0} \right) \right] + 1 \quad (D.61)$$

Damit lässt sich bei Kenntnis der Brennstoffzusammensetzung und Messung des  $CO_2$ -Gehaltes sowie des  $CO$ -Gehaltes im Abgas der Luftüberschuss bestimmen. Bei heutigen Messgeräten sind die entsprechenden Brennstoffparameter in der Regel intern hinterlegt. Für einige ausgewählte Brennstoffe sind die Abgasvolumina und der  $CO_{2,max}$ -Wert in Tabelle D.3 zusammengestellt.

Für die dargestellten Brennstoffe ergibt sich ein  $f_{B0}$  im Bereich von  $0,933 \dots 0,995$ . Mit der Näherung  $f_{B0} \approx 1$  vereinfacht sich Gleichung D.61 zu

$$\lambda \approx \left[ \left( \frac{\gamma_{CO_2,ideal}}{\gamma_{CO_2,real} + \gamma_{CO_{real}}} \cdot 1 - 1 \right) \right] + 1 \quad (D.62)$$

$$\approx \left( \frac{\gamma_{CO_2,ideal}}{\gamma_{CO_2,real} + \gamma_{CO_{real}}} \right) \quad (D.63)$$

bei sehr geringen Mengen CO:

$$\lambda \approx \left( \frac{\gamma_{CO_2,ideal}}{\gamma_{CO_2,real}} \right) \quad (D.64)$$

Bei praktischen Anlagen kann diese Näherung benutzt werden, um den Luftüberschuss abzuschätzen.

Wird statt des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Sauerstoffgehalt im Abgas gemessen, kann aus diesem mit Gleichung D.65 der CO<sub>2</sub>-Gehalt berechnet werden [ZIV, 1999].

$$\gamma_{CO_2,real} = \gamma_{CO_2,ideal} \cdot \left( 1 - \frac{\gamma_{O_2,real}}{0,21} \right) \quad (D.65)$$

Für D.61 ergibt sich dann

$$\lambda = \left[ \left( \frac{21}{21 - \gamma_{O_2,real}} - 1 \right) \cdot \left( \frac{V_{A,th,tr}}{V_{L,th}} \right) \right] + 1 \quad (D.66)$$

$$= \left[ \left( \frac{\gamma_{O_2,real}}{21 - \gamma_{O_2,real}} \right) \cdot \left( \frac{V_{A,th,tr}}{V_{L,th}} \right) \right] + 1 \quad (D.67)$$

$$= \left[ \left( \frac{\gamma_{O_2,real}}{21 - \gamma_{O_2,real}} \right) \cdot f_{B0} \right] + 1 \quad (D.68)$$

Mit der Näherung  $f_{B0} \approx 1$  ergibt sich für D.68

$$\lambda \approx \frac{0,21}{0,21 - \gamma_{O_2,real}} \quad (D.69)$$

**Tabelle D.3:** *Spezifische Zusammensetzung und Abgaswerte ausgewählter Brennstoffe (Daten aus [ZIV, 1995])*

Brennstoff	Zusammensetzung						Heizwert		Abgaswerte (berechnet)			
	$\mu_C$	$\mu_H$	$\mu_S$	$\mu_N$	$\mu_O$	$\mu_W$	Asche	$H_u$	$V_{A,th,tr}$	$V_{A,th,f}$	$CO_{2,ideal}$	$f_{B0}$
	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	Mass.-%	MJ/kg	$\frac{m^3}{kg}$	$\frac{m^3}{kg}$	%	-
Heizöl EL	86,3	13,4	0,2	-	0,1	-	-	42,70	10,5	12,0	15,24	0,9329
Heizöl S	85,0	11,7	2,1	0,2	1,0	-	-	41,01	10,1	11,4	15,66	0,9392
Braunkohle, sächsisch	40,3	2,9	1,8	1,1	10,1	$\approx 37$	6,8	15,07	4,0	4,8	18,70	0,9789
Braunkohle, rheinisch	52,0	4,2	1,0	1,4	11,6	24,0	5,8	19,93	5,2	6,0	18,38	0,9728
Braunkohlenbriketts, sächsisch	50,8	4,3	2,0	0,9	16,3	$\approx 17$	8,7	18,92	5,1	5,8	18,59	0,9763
Braunkohlenbriketts, rheinisch	53,1	4,0	0,3	0,6	19,0	19,0	4,0	19,50	5,1	5,8	19,39	0,9825
Steinkohlenbriketts, westfälische	81,9	4,2	1,2	1,1	2,7	1,7	7,2	32,45	8,1	8,6	18,64	0,9930
Laubholz*, lufttrocken	42,4	5,1	-	0,1	37,2	$\approx 15$	0,2	15,60	3,9	4,6	20,36	0,9930
Nadelholz*, lufttrocken	38,0	4,6	-	0,1	34,0	$\approx 23$	0,2	13,32	3,4	4,2	20,43	0,9936
Holzpellets*	51,6	6,0	0,1	0,3	32,8	8,8	0,5	18,00	5,0	5,7	19,21	0,9793
Stroh*, lufttrocken	42,4	5,0	0,1	0,4	33,8	14	4,3	14,20	3,9	4,7	19,98	0,9892
Torf, trocken	36,4	3,4	0,7	2,2	22,4	$\approx 25$	10,0	13,65	3,4	4,1	19,84	0,9945

\* abhängig von Biomasseart, Jahreszeit, Wachstumsbedingungen usw.

## D.5 Wärmeinhalt der Abgase (Abgasverlust) - Berechnung der Siegert-Koeffizienten

Für eine Heizungsanlage lässt sich nach [ZIV, 1995] eine Energiebilanz der Form

$$H_u \cdot m_B + Q_L + Q_B = Q_{nutz} + Q_S + Q_{Asche} + Q_A + Q_{unv} \quad (D.70)$$

mit

$H_u$  : Heizwert

$m_B$  : Brennstoffmasse

$Q_L$  : Wärmeinhalt der Verbrennungsluft

$Q_B$  : Wärmeinhalt des Brennstoffes

$Q_{nutz}$  : Nutzwärme

$Q_S$  : Strahlungswärme (Verluste)

$Q_{Asche}$  : Verluste durch Unverbranntes in der Asche

$Q_A$  : Wärmeinhalt der Abgase (Abgasverlust)

$Q_{unv}$  : brennbare Abgasbestandteile

aufstellen. In der Regel sind die Wärmeinhalte von Verbrennungsluft  $Q_L$  und Brennstoff  $Q_B$  bei Kleinf Feuerungsanlagen vernachlässigbar, da dort keine Luft- oder Brennstoffvorwärmung stattfindet und die Energieinhalte im Vergleich sehr gering sind. Werden zudem die spezifischen Größen verwendet ergibt sich D.70 zu

$$H_u = \frac{Q_{nutz} + Q_S + Q_{Asche} + Q_A + Q_{unv}}{m_B} \quad (D.71)$$

Zur Bewertung der feuerungstechnischen Qualität einer Anlage wird in der Praxis häufig nur der Wärmeverlust durch das Abgas  $Q_A$  betrachtet. In der Regel wird dieser Abgasverlust auf den Heizwert des Brennstoffes bezogen und in % angegeben. Da bei der praktischen Anlage das feuchte Abgas mit überschüssiger Luft aus der Feuerungsanlage austritt, müssen Luftüberschuss und Wasseranteil im Abgas berücksichtigt werden. Die Berechnung erfolgt dann mit der praktischen (bei Luftüberschuss), feuchten Abgasmenge  $V_{A,pr,f}$ .

$$q_A = \frac{Q_A}{H_u} = \frac{V_{A,pr,f} \cdot c_{p,A} \cdot (T_A - T_L)}{H_u} \cdot 100\% \quad (D.72)$$

$$= \frac{V_{A,pr,f} \cdot c_{p,A} \cdot (T_A - T_L)}{H_u} \cdot 100\% \quad (D.73)$$

Die spezifische Wärmekapazität des Abgases  $c_{p,A}$  lässt sich aus den Wärmekapazitäten der enthaltenen Gase ermitteln.

$$c_{p,A} = \overbrace{V_{CO_2} \cdot c_{p,CO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{p,H_2O} + V_{SO_2} \cdot c_{p,SO_2} + V_{N_2,B} \cdot c_{p,N_2} + V_{L,th} \cdot 0,79 \cdot c_{p,N_2}}^{\text{brennstoffabhängig}} + \underbrace{V_{O_2} \cdot c_{p,O_2} + V_{N_2} \cdot c_{p,N_2}}_{\lambda \text{ abhängig}} \cdot \frac{1}{\underbrace{V_{A,pr,f}}_{\text{Brennstoff} + \lambda \text{ abhängig}}} \quad (D.74)$$

Der Sauerstoff- und Stickstoffanteil lässt sich als Variable vom Luftüberschuss und vom theoretischen Luftbedarf ausdrücken:

$$V_{O_2} = V_{L,\ddot{u}b} \cdot 0,21 = (\lambda - 1) \cdot V_{L,th} \cdot 0,21 \quad (D.75)$$

$$V_{N_2} = V_{L,\ddot{u}b} \cdot 0,79 = (\lambda - 1) \cdot V_{L,th} \cdot 0,79 \quad (D.76)$$

Wird die Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazitäten der Einzelgase vernachlässigt, lässt sich Gleichung D.74 durch Koeffizientenbildung ausdrücken als

$$c_{p,A} = \frac{K_1 + (\lambda - 1) \cdot K_2}{V_{A,pr,f}} \quad (D.77)$$

mit

$$K_1 = V_{CO_2} \cdot c_{p,CO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{p,H_2O} + V_{SO_2} \cdot c_{p,SO_2} + V_{N_2,B} \cdot c_{p,N_2} + V_{L,th} \cdot 0,79 \cdot c_{p,N_2} \quad (D.78)$$

$$K_2 = V_{L,th} \cdot 0,21 \cdot c_{p,O_2} + V_{L,th} \cdot 0,79 \cdot c_{p,N_2} \quad (D.79)$$

Setzt man D.77 in D.72 ein, ergibt sich für  $q_A$

$$q_A = (T_A - T_L) \cdot \frac{K_1 + (\lambda - 1) \cdot K_2}{H_u} \cdot 100\% \quad (D.80)$$

Mit den Beziehungen für  $\lambda$  aus Abschnitt D.4

$$\lambda - 1 = \left( \frac{\gamma_{CO_2,ideal}}{\gamma_{CO_2,real} + \gamma_{CO,real}} \cdot f_{B0} - f_{B0} \right) \quad (D.81)$$

$$\lambda - 1 = \left( \frac{21}{21 - \gamma_{O_2,real}} \cdot f_{B0} - f_{B0} \right) \quad (D.82)$$

lässt sich der Abgasverlust in Abhängigkeit vom Kohlendioxid- bzw. Sauerstoffgehalt ausdrücken. Üblicherweise setzt man hier den gemessenen  $CO_2$ - ( $\gamma_{CO_2,real}$ ) bzw.  $O_2$ -Anteil ( $\gamma_{O_2,real}$ ) im Abgas als Prozentwert ein:

$$\gamma_{\%,CO_2,real} = \gamma_{CO_2,real} \cdot 100\% \quad (D.83)$$

$$\gamma_{\%,O_2,real} = \gamma_{O_2,real} \cdot 100\% \quad (D.84)$$

Gleichung D.80 lässt sich so in Abhängigkeit vom  $O_2$ - bzw.  $CO_2$ -Gehalt ausdrücken.

$$q_A = (T_A - T_L) \cdot \left( \frac{K_1 \cdot 100\%}{H_u} + (\lambda - 1) \cdot \frac{K_2 \cdot 100\%}{H_u} \right) \quad (D.85)$$

$$= (T_A - T_L) \cdot \left( \frac{K_1 \cdot 100\%}{H_u} + \left( \frac{21}{21 - \gamma_{\%,O_2,real}} \cdot f_{B0} - f_{B0} \right) \cdot \frac{K_2 \cdot 100\%}{H_u} \right) \quad (D.86)$$

$$= (T_A - T_L) \cdot \left( \frac{\frac{21 \cdot f_{B0} \cdot K_2 \cdot 100\%}{H_u}}{21 - \gamma_{\%,O_2,real}} + \frac{(K_1 \cdot 100\%) - (f_{B0} \cdot K_2 \cdot 100\%)}{H_u} \right) \quad (D.87)$$

Durch Koeffizientenbildung lässt sich D.87 vereinfachen zu

$$q_A = (T_A - T_L) \cdot \left( \frac{A_2}{21 - \gamma_{\%,O_2,real}} + B \right) \quad (D.88)$$

mit

$$A_2 = \frac{21 \cdot f_{B0} \cdot K_2 \cdot 100\%}{H_u} \quad (D.89)$$

$$B = \frac{(K_1 \cdot 100\%) - (f_{B0} \cdot K_2 \cdot 100\%)}{H_u} \quad (D.90)$$

Bei Verwendung des Kohlendioxidgehaltes im Abgas  $\gamma_{\%,CO_2,real}$  ergibt sich  $q_A$  zu



$$q_A = (T_A - T_L) \cdot \left( \frac{A_1}{\gamma_{\%,CO_2,real} + \gamma_{\%,CO_{real}}} + B \right) \quad (D.91)$$

mit

$$A_1 = \frac{\gamma_{\%,CO_2,ideal} \cdot f_{B0} \cdot K_2 \cdot 100\%}{H_u} \quad (D.92)$$

$$B = \frac{(K_1 \cdot 100\%) - (f_{B0} \cdot K_2 \cdot 100\%)}{H_u} \quad (D.93)$$

Die Koeffizienten  $A_1$ ,  $A_2$  und  $B$  sind nur von der Elementarzusammensetzung des Brennstoffes abhängig.

Vernachlässigt werden bei dieser Berechnung

- Wärmemenge im Brennstoff und
- Wärmemenge der Verbrennungsluft sowie die
- Temperaturabhängigkeit der Wärmekapazitäten.

In Tabelle D.4 sind die, für die Bestimmung des Abgasverlustes relevanten, Zwischengrößen und Koeffizienten berechnet worden. Grundlage der Berechnung war die Elementaranalyse aus Tabelle F.1.

**Tabelle D.4:** *Zwischengrößen und Koeffizienten der Versuchsbrennstoffe zur Bestimmung des Abgasverlustes*

		Holzpellets ohne Presshilfsmittel	Holzpellets mit 2,0% Maisstärke	Holzpellets mit 1,5% Weizenstärke	Holzpellets mit 1,5% Kartoffelstärke	Holzpellets mit 1,5% Roggenmehl
$CO_{2,ideal}$	%	20,16	20,14	20,13	20,14	20,23
$V_{CO_2}$	Nm <sup>3</sup> /kg	0,9561	0,9543	0,9506	0,9543	0,9636
$V_{H_2O}$	Nm <sup>3</sup> /kg	0,7721	0,7888	0,7959	0,7890	0,7597
$V_{SO_2}$	Nm <sup>3</sup> /kg	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
$V_{N_2,B}$	Nm <sup>3</sup> /kg	0,0024	0,0023	0,0025	0,0026	0,0025
$V_{L,th}$	Nm <sup>3</sup> /kg	4,7875	4,7839	4,7680	4,7812	4,8019
$V_{A,th,tr}$	Nm <sup>3</sup> /kg	4,7439	4,7391	4,7230	4,7373	4,7628
$c_{p,CO_2}$	kJ/m <sup>3</sup> K			1,680		
$c_{p,H_2O(g)}$	kJ/m <sup>3</sup> K			1,495		
$c_{p,SO_2}$	kJ/m <sup>3</sup> K			1,703		
$c_{p,N_2}$	kJ/m <sup>3</sup> K			1,300		
$c_{p,O_2}$	kJ/m <sup>3</sup> K			1,315		
$K1$	kJ/kgK	7,6811	7,6992	7,6874	7,6971	7,6899
$K2$	kJ/kgK	6,2388	6,2341	6,2134	6,2306	6,2576
$f_{B0}$	-	0,9909	0,9906	0,9906	0,9908	0,9919
$A1$	% <sup>2</sup> /K	0,7399	0,7411	0,7444	0,7469	0,7334
$A2$	% <sup>2</sup> /K	0,7709	0,7729	0,7768	0,7786	0,7613
$B$	%/K	0,0089	0,0091	0,0092	0,0092	0,0087

## E Technische Daten der Feuerungsanlagen

**Tabelle E.1:** *Technische Daten der Feuerungsanlagen [Viessmann, 2006] [Paradigma, 2007]*

<b>Paradigma Pelletti II SR 203    Viessmann Vitolig VL3A</b>		
NENNLEISTUNG in kW		
	6 - 20	4,3 - 15,0
	(auf 5 - 15 reduziert)	
INHALTE in l		
Kesselwasser	68	59
Brennstoffbehälter	62	232
	(auf 152 vergrößert)	
Aschebehälter	25	36
VORLAUFTEMPERATUR in °C		
Betriebsbereich	60 - 90	60 - 75
maximal	90	95
minimal	55	60
MITTLERE ABGASTEMPERATUR in °C		
Vollast	160	136
Teillast	100	82
ABGASMASSENSTROM in kg/h		
Vollast	44 (6 - 20 kW)	33,1
	33 (5 - 15 kW)	
Teillast	15 (6 - 20 kW)	12,4
	11,3 (5 - 15 kW)	
NOTWENDIGER FÖRDERDRUCK DER ABGASANLAGE in Pa		
	12	5

## F Versuchsbrennstoffe - Analysedaten



(a) ohne PHM



(b) Maisstärke 2,0 %



(c) Kartoffelstärke 1,5 %



(d) Weizenstärke 1,5 %



(e) Roggenmehl 1,5 %

**Abbildung F.1:** *Detailaufnahmen der verschiedenen Pelletchargen (jeweils ca. 100 g)*

## **F.1 Elementaranalyse**

**Tabelle F.1:** *Elementaranalyse der reinen PHM und der Versuchspellets der RWTH Aachen (Werte analysefeucht)*

<b>Brennstoff/PHM</b>	<b>Wassergehalt</b>	<b>Aschegehalt</b>	<b>Brennwert <math>H_o</math></b>	<b>Heizwert <math>H_u</math></b>	<b>Kohlenstoff</b>	<b>Wasserstoff</b>	<b>Stickstoff</b>	<b>Schwefel</b>	<b>Chlor</b>	<b>Sauerstoff</b>
	<i>Mass. - %</i>	<i>Mass. - %</i>	<i><math>\frac{MJ}{kg}</math></i>	<i><math>\frac{MJ}{kg}</math></i>	<i>Mass. - %</i>	<i>Mass. - %</i>	<i>Mass. - %</i>	<i>Mass. - %</i>	<i>Mass. - %</i>	<i>Mass. - %</i>
Maisstärke (PHM, rein)	12,1	0,08	15,51	14,13	44,3	6,27	0,27	0,05	u.B.	36,93
Weizenstärke (PHM, rein)	12,1	0,16	15,44	14,07	44,2	6,25	0,24	0,05	u.B.	37,00
Kartoffelstärke (PHM, rein)	15,7	0,32	14,67	13,27	42,3	6,36	0,20	0,05	u.B.	35,07
Roggenmehl (PHM, rein)	11,7	1,28	16,30	14,92	45,7	6,29	1,59	0,12	u.B.	33,32
Holzpellets ohne PHM	8,8	0,49	18,15	16,84	51,6	5,96	0,30	0,05	u.B.	32,95
Holzpellets Maisstärke 2,0%	8,6	0,33	18,23	16,93	51,8	5,93	0,34	0,05	u.B.	32,95
Holzpellets Weizenstärke 1,5%	10,0	0,28	17,97	16,64	51,3	6,04	0,31	0,05	u.B.	32,02
Holzpellets Kartoffelstärke 1,5%	9,8	0,28	17,97	16,65	51,5	6,00	0,33	0,05	u.B.	32,04
Holzpellets Roggenmehl 1,5%	8,7	0,34	18,41	17,12	52,0	5,86	0,31	0,05	u.B.	32,74

*u.B. : unterhalb Bestimmungsgrenze*

## F.2 Alkalienanalyse

**Tabelle F.2:** Alkalienanalyse der reinen PHM und der Versuchspellets der RWTH Aachen

Brennstoff/PHM	Na	K	Ca	Mg	Fe	Si
	$\frac{mg}{kg}$	$\frac{mg}{kg}$	$\frac{mg}{kg}$	$\frac{mg}{kg}$	$\frac{mg}{kg}$	$\frac{mg}{kg}$
Maisstärke (PHM, rein)	81	35	15	2,6	29	381
Weizenstärke (PHM, rein)	44	38	161	5	16	386 - 437
Kartoffelstärke (PHM, rein)	64	374	198	31	21	710 - 962
Roggenmehl (PHM, rein)	23	2200	430	800	33	1070
Holzpellets ohne PHM	18 - 25	221	773 - 833	92 - 113	104 - 139	250 - 322
Holzpellets Maisstärke 2,0%	22	212 - 244	737 - 956	76 - 98	56 - 75	155 - 177
Holzpellets Weizenstärke 1,5%	17	217	736	85	44	219 - 336
Holzpellets Kartoffelstärke 1,5%	15	216	719	86	40	264
Holzpellets Roggenmehl 1,5%	18	235	683	81	38 - 46	180



# G Messdaten

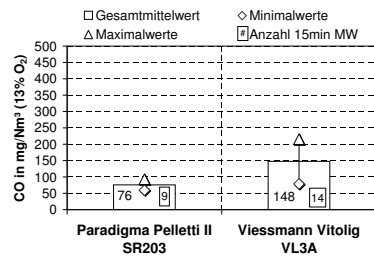
## G.1 Emissionen

Tabelle G.1: mittlere Emissions-, Abgasverlust- und Luftüberschusswerte des Paradigma Pelletti II SR 203

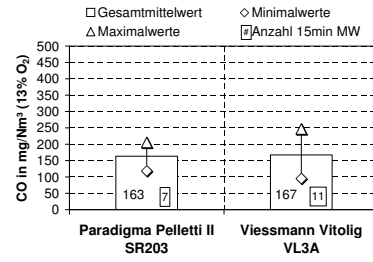
Brennstoff	Kohlenmonoxid			Stickoxide			Gesamtkohlenstoff (TOC)			Abgasverlust			Luftüberschuss		
	$\overline{E}_{CO}$	$E_{CO,max}$	$E_{CO,min}$	$\overline{E}_{NO_x}$	$E_{NO_x,max}$	$E_{NO_x,min}$	$\overline{E}_{TOC}$	$E_{TOC,max}$	$E_{TOC,min}$	$\overline{q}_A$	$q_{A,max}$	$q_{A,min}$	$\overline{\lambda}$	$\lambda_{max}$	$\lambda_{min}$
	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	%	%	%			
HP ohne PHM	76	93	59	76	78	75	1,9	2,3	1,7	12,6	13,0	12,2	2,4	2,5	2,3
HP ohne PHM zerkleinert	226	387	194	74	78	73	3,1	5,1	2,6	13,1	14,1	12,7	2,4	2,8	2,3
HP 1,5% Kartoffel- stärke	345	494	286	85	86	83	5,2	10,7	3,8	14,7	15,1	14,3	3,0	3,2	2,9
HP 1,5% Kartoffel- stärke zerkleinert	247	361	172	78	79	77	2,9	5,6	2,1	15,0	16,0	14,2	2,8	3,1	2,6
HP 1,5% Roggenmehl	209	343	165	93	95	91	4,1	6,2	3,7	14,6	15,9	14,1	3,1	3,5	2,9
HP 1,5% Roggenmehl zerkleinert	204	251	166	92	94	90	3,0	4,6	2,1	14,2	14,8	13,5	2,7	2,9	2,5
HP 2,0% Maisstärke	163	205	118	75	76	74	2,5	2,7	2,2	12,9	13,7	12,5	2,6	2,7	2,5
HP 1,5% Weizen- stärke zerkleinert	214	315	170	79	81	77	2,9	4,7	2,3	14,8	16,1	14,2	2,7	3,1	2,6

Tabelle G.2: mittlere Emissions-, Abgasverlust- und Luftüberschusswerte des Viessmann Vitolig VL3A

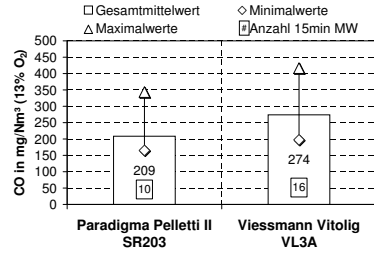
Brennstoff	Kohlenmonoxid			Stickoxide			Gesamtkohlenstoff (TOC)			Abgasverlust			Luftüberschuss		
	$\overline{E}_{CO}$	$E_{CO,max}$	$E_{CO,min}$	$\overline{E}_{NO_x}$	$E_{NO_x,max}$	$E_{NO_x,min}$	$\overline{E}_{TOC}$	$E_{TOC,max}$	$E_{TOC,min}$	$\overline{q}_A$	$q_{A,max}$	$q_{A,min}$	$\overline{\lambda}$	$\lambda_{max}$	$\lambda_{min}$
	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	mg/m <sup>3</sup> <sub>n</sub>	%	%	%			
HP ohne PHM	148	216	79	89	91	89	3,5	7,5	0,6	10,9	10,5	10,3	2,2	2,3	2,1
HP ohne PHM zerkleinert	254	292	204	92	94	92	4,4	6,2	2,6	13,5	14,0	13,4	2,7	2,8	2,7
HP 1,5% Kartoffel- stärke	360	445	299	93	94	92	6,1	9,9	2,2	16,9	17,3	16,5	3,8	3,9	3,6
HP 1,5% Kartoffel- stärke zerkleinert	173	226	118	94	96	93	2,1	3,8	1,0	15,6	16,2	14,9	3,1	3,3	3,0
HP 1,5% Roggenmehl	274	417	197	103	104	101	5,6	10,6	2,2	17,1	17,7	16,5	3,9	4,1	3,8
HP 1,5% Roggenmehl zerkleinert	151	239	94	106	109	105	3,2	8,8	1,0	12,6	13,6	12,2	2,7	3,1	2,6
HP 2,0% Maisstärke	167	247	95	87	88	86	3,7	8,2	1,1	12,6	13,6	12,2	2,7	3,1	2,6
HP 1,5% Weizen- stärke zerkleinert	177	236	97	89	90	89	5,1	10,1	0,8	11,4	11,7	11,0	2,2	2,3	2,1



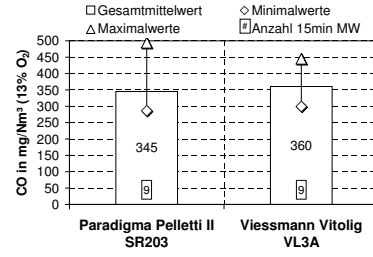
(a) ohne Presshilfsmittel



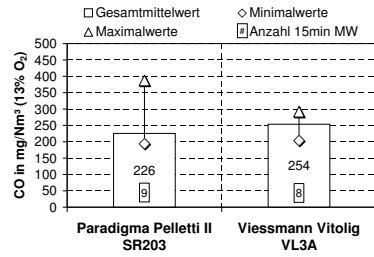
(b) Maisstärke 2.0 %



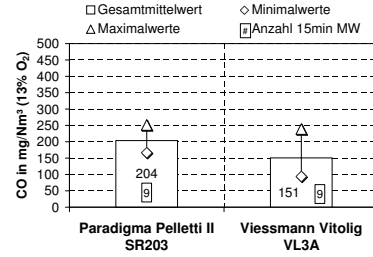
(c) Roggenmehl 1,5 %



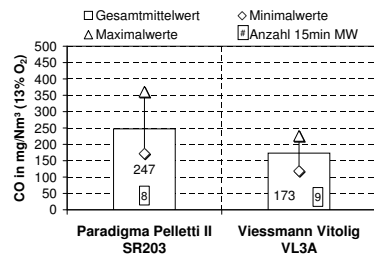
(d) Kartoffelstärke 1,5 %



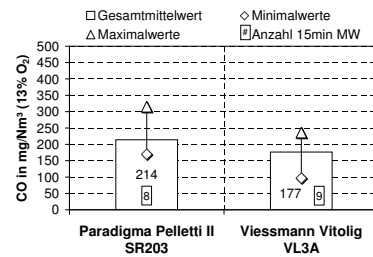
(e) ohne Presshilfsmittel zerkleinert



(f) Roggenmehl 1,5 % zerkleinert

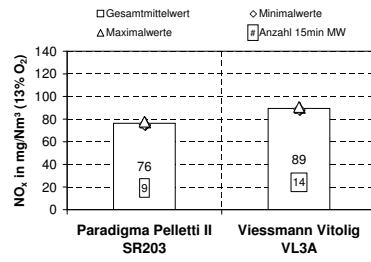


(g) Kartoffelstärke 1,5 % zerkleinert

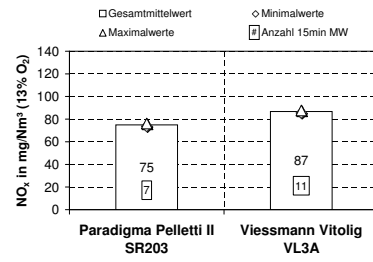


(h) Weizenstärke 1,5 % zerkleinert

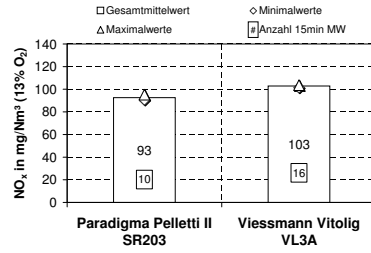
Abbildung G.1: mittlere Kohlenmonoxidemissionen in  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  (bezogen auf 13% Sauerstoffgehalt) im Detail



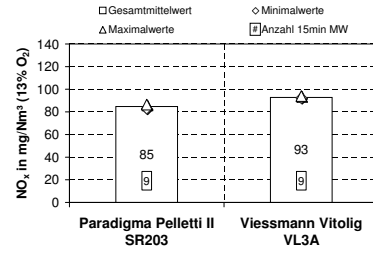
(a) ohne Presshilfsmittel



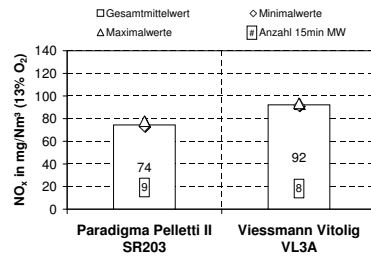
(b) Maisstärke 2.0 %



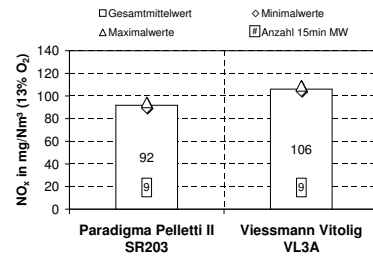
(c) Roggenmehl 1,5 %



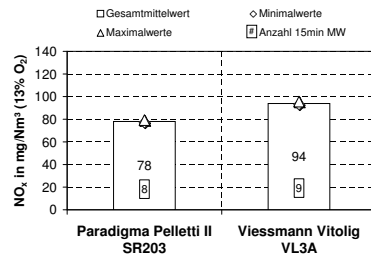
(d) Kartoffelstärke 1,5 %



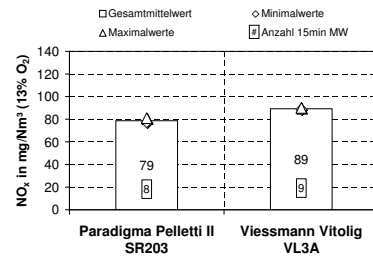
(e) ohne Presshilfsmittel zer-  
kleinert



(f) Roggenmehl 1,5 % zer-  
kleinert



(g) Kartoffelstärke 1,5 % zer-  
kleinert



(h) Weizenstärke 1,5 % zer-  
kleinert

Abbildung G.2: mittlere Stickoxidemissionen in mg/Nm<sup>3</sup> (bezogen auf 13% Sauerstoffgehalt) im Detail

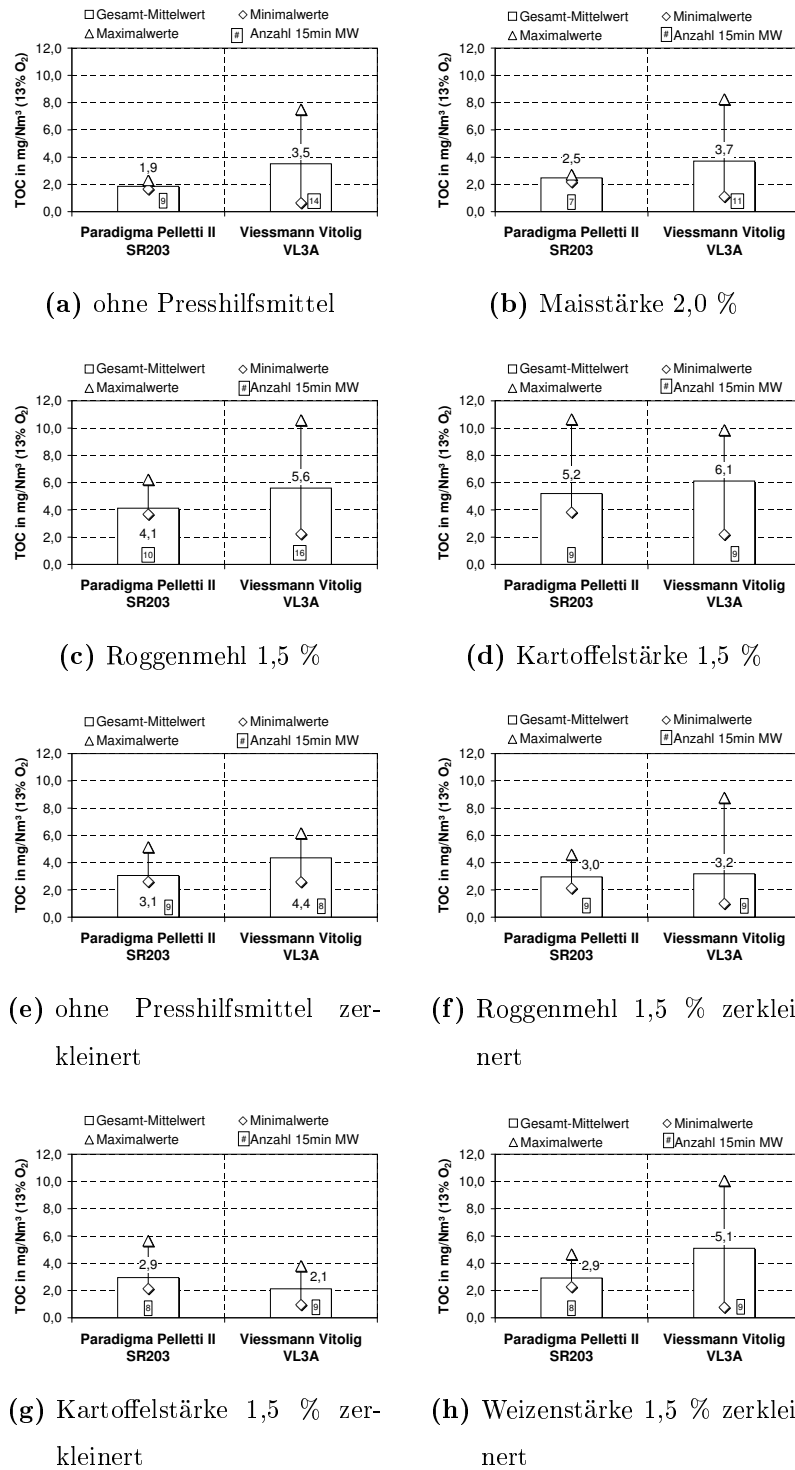
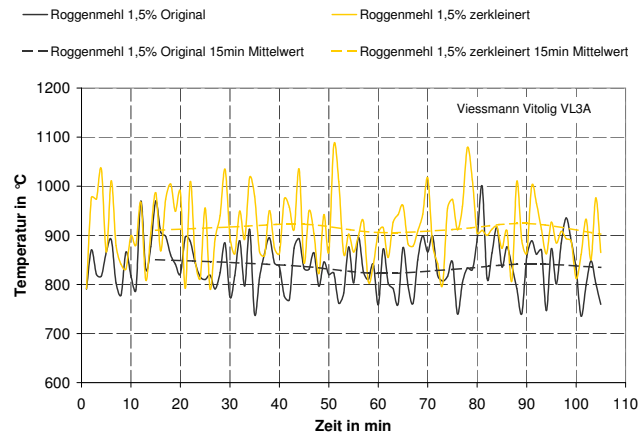
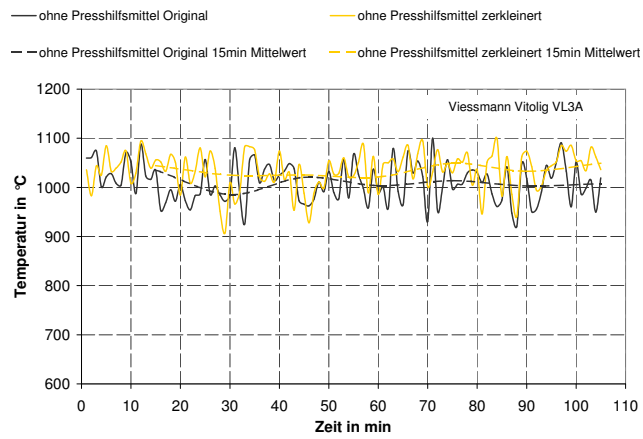


Abbildung G.3: mittlere Gesamt-C-Emissionen (TOC) in mg/Nm<sup>3</sup> (bezogen auf 13% Sauerstoffgehalt) im Detail

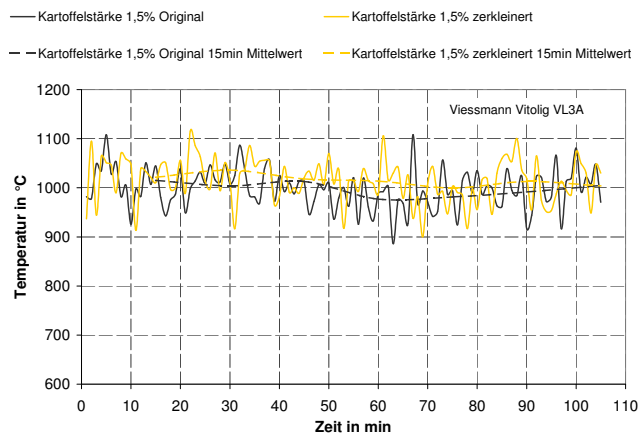
## **G.2 Glutbetttemperatur**



(a) 1,5 % Roggenmehl Original und zerkleinert



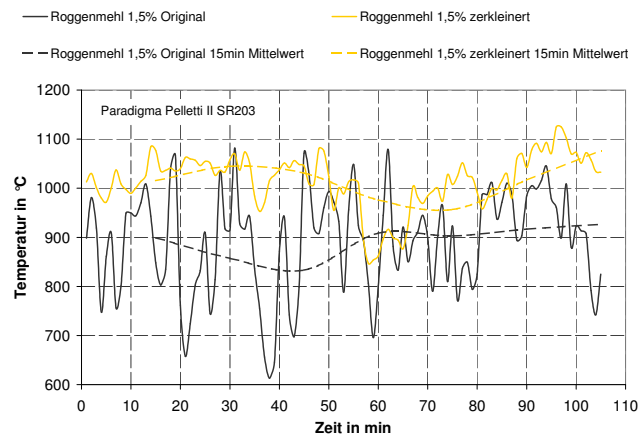
(b) ohne Presshilfsmittel Original und zerkleinert



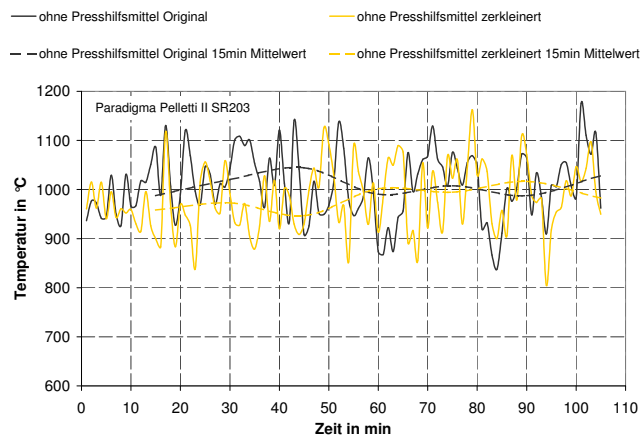
(c) 1,5 % Kartoffelstärke Original und zerkleinert

Abbildung G.4: Glutbetttemperatur des Viessmann Vitotig VL3A bei verschiedenen Presshilfsmitteln

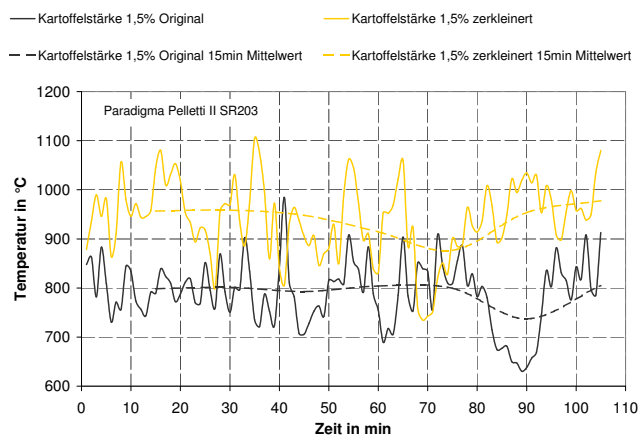




(a) 1,5 % Roggenmehl Original und zerkleinert



(b) ohne Presshilfsmittel Original und zerkleinert



(c) 1,5 % Kartoffelstärke Original und zerkleinert

Abbildung G.5: Glutbetttemperatur des Paradigma Pelletti II SR203 bei verschiedenen Presshilfsmitteln

# Erklärung zur Diplomarbeit

Ich versichere hiermit, dass ich meine Diplomarbeit mit dem Thema

*Optimierung der Pelletproduktion*

*Untersuchungen zum Einfluss von Pelletqualität und Feuerraumdesign*

selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Leipzig, den 8. Oktober 2008

---

UNTERSCHRIFT